



Vliv podmínek měření na mechanicko-fyzikální vlastnosti vysocepevných délkových útvarů

Diplomová práce

Studijní program: N3106 – Textilní inženýrství
Studijní obor: 3106T017 – Oděvní a textilní technologie
Autor práce: **Bc. Michaela Zábranská**
Vedoucí práce: Ing. Iva Mertová





Influence of conditions of measuring on mechanical properties of high strength yarn and multifilament

Diploma thesis

Study programme: N3106 – Textile engineering
Study branch: 3106T017 – Clothing and textile engineering
Author: **Bc. Michaela Zábranská**
Supervisor: Ing. Iva Mertová



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michaela Zábranská**
Osobní číslo: **T13000096**
Studijní program: **N3106 Textilní inženýrství**
Studijní obor: **Oděvní a textilní technologie**
Název tématu: **Vliv podmínek měření na mechanicko-fyzikální vlastnosti vysocepevných délkových útvarů**
Zadávající katedra: **Katedra textilních technologií**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Vypracujte rešerši na téma mechanicko - fyzikální vlastnosti délkových vlákenných útvarů. Shrňte poznatky týkající se pracovních tahových křivek. Popište vliv rychlosti deformace (a také upínací délky) a vliv parametrů délkové textilie na průběh průměrné tahové křivky.
2. U vybraných přízí a multifilů naměřte a vyhodnoťte průměrné tahové křivky při různé rychlosti deformace. Zaměřte se zejména na pevnost, tažnost a počáteční modul.
3. Dle výsledků experimentu vyjádřete vliv rychlosti deformace na charakteristiky průměrných tahových křivek použitých vlákenných útvarů.

Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: cca 50 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

- [1] Neckář, B.: Morfologie a strukturní mechanika obecných vláknenných útvarů. Skripta. Technická univerzita v Liberci, 2001.
- [2] Hearle, J. W. S., Grosberg, P., Backer, S.: Structural mechanics of fibers, yarn and fabrics, John Wiley and Sons, Inc., USA, 1969.
- [3] Hu, J.: Structure and mechanics of woven fabrics, Woodhead publishing, England, 2004.
- [4] Saville, B. P.: Physical testing of textiles, Woodhead publishing, England, 1999.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Iva Mertová
Katedra textilních technologií

Datum zadání diplomové práce: 2. března 2014
Termín odevzdání diplomové práce: 14. května 2015


Ing. Jana Drašarová, Ph.D.
děkanka

L.S.


Ing. Brigita Kolářová Sirková, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 5. května 2015

Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Abstrakt

Existující normy pro měření tahových vlastností vysoce pevných multifilů a přízí stanovují rozdílné podmínky měření, zejména upínací délku, rychlost přičníku a typ použitých čelistí. Předpokládá se, že tyto faktory mají na výsledné tahové vlastnosti vliv.

Cílem této práce je ověření předpokladu významnosti těchto faktorů (upínací délka, rychlost přičníku,...) a případný návrh sjednocení těchto podmínek měření.

Vždy se dle norem měří jen při jedné upínací délce a s jednou rychlostí přičníku (případně rychlostí deformace), a to statisticky doporučené množství cca 50trhů.

Byl pozorován vliv zmíněných podmínek měření (rychlost deformace, upínací délka) na jejich mechanicko-fyzikální vlastnosti a to na pevnost, tažnost, práci do přetrhu a počáteční modul pružnosti. Na základě zjištěných výsledků byly formulovány závěry pro jednotlivé materiály.

Klíčová slova: Vysoce pevné materiály, Kevlar, Twaron, tahová křivka, rychlost deformace, upínací délka

Abstract

Existing standards for measuring high strength multifilaments and yarns define various conditions of measurements, namely gauge length, rate of displacement and type of jaws. In general, these conditions affect the measured strain-stress curves.

The aim of these thesis is to verify the influence of these factors (gauge length,rate of displacement ,strain rate) and to propose common measurement conditions for studied materials.

According to standard, measurements are performed with one gauge length and with one rate of displacement (or strain rate). It is recommended to repeat the test 50 times to obtain sufficient statistics.

Influence of experimental conditions on mechanical properties, especially tensile strength, elongation, work of rupture and elastic modulus, was investigated. Based on these results, recommendations for testing of each material were formulated.

Keywords: High strenth materials, Kevlar, Twaron, strain-stress curve, strain rate, gage length

Poděkování

Tímto způsobem bych ráda poděkovala paní Ing. Ivě Mertové za odborné vedení této diplomové práce, poskytnutí studijních materiálů a cenných rad. Též bych chtěla poděkovat své rodině za psychickou a materiální podporu.

Obsah

Seznam zkratek	11
1 Úvod	13
2 Teoretická část	14
2.1 Příze	14
2.2 Multifil	14
2.3 Vysoce pevné materiály	14
2.3.1 Kevlar	15
2.3.2 Twaron	16
2.4 Geometrické vlastnosti přízí	17
2.4.1 Jemnost	17
2.4.2 Průměr a zaplnění	17
2.4.3 Zákrut	18
2.4.4 Poissonův poměr	18
2.4.5 Délka vláken	19
2.4.6 Počet vláken v příčném řezu	19
2.4.7 Technologie výroby	20
2.5 Mechanické vlastnosti přízí	20
2.5.1 Jednoosé zatěžování	21
2.5.2 Tahová pracovní křivka	23
2.5.3 Ultimatívní charakteristiky	30
2.5.4 Faktory působící na průběh průměrné tahové křivky	33
2.6 Rešerše	35
2.7 Analýza rozptylu (ANOVA)	38
2.7.1 Dvoufaktorová analýza rozptylu	39
2.7.2 Vyvážená dvoufaktorová analýza rozptylu	39
3 Experimentální část	41
3.1 Vzorky	41
3.2 Měřící aparatura	41
3.3 Výsledky měření a diskuse	43
3.3.1 Průměrné tahové křivky	43
3.4 Multifil z Twaronu	46
3.4.1 Pevnost	47
3.4.2 Tažnost	50

3.4.3	Práce do přetrhu	53
3.4.4	Modul pružnosti	56
3.4.5	Shrnutí pro multifil z Twaronu	59
3.5	Multifil z Kevlaru	60
3.5.1	Pevnost	61
3.5.2	Tažnost	64
3.5.3	Práce do přetrhu	67
3.5.4	Modul pružnosti	70
3.5.5	Shrnutí výsledků pro multifil z Kevlaru	73
3.6	Příze z Kevlaru	74
3.6.1	Pevnost	75
3.6.2	Tažnost	78
3.6.3	Práce do přetrhu	81
3.6.4	Modul pružnosti	84
4	Závěr	88
A	Příloha průměrné tahové křivky	99
B	Příloha základní statistické charakteristiky	105

Seznam zkratk

T	jemnost [tex]
m	hmotnost [kg]
l	délka útvaru [m]
V	objem [m ³]
ρ	hustota [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$]
S	substanční průřez příze [m ²]
D_s	substanční průměr příze [mm]
D	průměr příze [mm]
μ	zaplnění příze [-]
V_v	objem vláken [m ³]
V_c	celkový objem příze [m ³]
Z	zákrut [m ⁻¹]
S_c	celková plocha průřezu příze [m ²]
α	Koechlinův zákrutový koeficient [m ⁻¹ ktex ^{-1/2}]
a	Phrixův zákrutový koeficient [m ⁻¹ ktex ^{-2/3}]
ν	Poissonův poměr [-]
ε_T	příčné zkrácení útvaru [-]
ε	poměrné prodloužení [-]
S_0	původní plocha vlákna [m ²]
V_0	původní objem vlákna [m ³]
n	počet
k_n	součinitel korekce počtu vláken [-]
τ	poměrná jemnost příze [-]
S^*	střední velikost řezné plochy vlákna [m ²]
v_ε	rychlost deformace [1/min]
$d\varepsilon$	přírůstek prodloužení [-]
dt	přírůstek času [-]
$v_{př}$	rychlost pohybu příčnicku [mm/min]
l_0	původní délka útvaru [mm]
σ	napětí [Pa]
E	modul pružnosti [Pa]

F	síla [N]
W	práce do přetrhu [J]
dl	přírůstek délky [-]
ε_y	tažnost multifilu [%]
ε_b	tažnost filamentu [%]
β_c	úhel sklonu vláken [°]
β_b	úhel sklonu povrchového vlákna [°]
C_y	faktor seskání [-]
σ_f^s	napětí vlákna, statické zatížení [Pa]
E_f^s	modul pružnosti vlákna, statické zatížení [Pa]
ε_f^s	prodloužení vlákna, statické zatížení [-]
σ_f^d	napětí vlákna, dynamické zatížení [Pa]
E_f^d	modul pružnosti vlákna, dynamické zatížení [Pa]
ε_f^d	prodloužení vlákna, dynamické zatížení [-]
M	počet řádků
M_R	nevychýlený odhad rozptylu
N	počet sloupců
y_{ijk}	výsledek měření
μ_{ij}	skutečná hodnota výsledků analýzy
ε_{ijk}	náhodná chyba
α_i	vliv i-té úrovně faktoru A
β_j	vliv j-té úrovně faktoru B
τ_{ij}	interakce
\hat{e}_{ijk}	odhad reziduí (odchylek)
$\hat{\tau}_{ijk}$	odhad interakcí

1 Úvod

Vysoce pevné materiály se těší velké oblibě díky jejich specifickým vlastnostem. Vysoká odolnost v tahu, a také odolnost vůči vysokým teplotám jim zajistila důležité postavení v různých odvětvích průmyslu. Vzhledem k jejich použití (neprůstřelné vesty, tažná lana, výztuhy pneumatik) firmy dbají na splnění interních norem. Ty obsahují pokyny ke správnému způsobu zkoušení a požadavky na materiál, ovšem tyto normy se pro jednotlivé materiály liší. Nastavují různé podmínky měření (upínací délku, rychlost přičnku, typ čelistí), tudíž předpokládáme jejich vliv na mechanické vlastnosti délkových textilií. Proto je cílem této práce ověření významnosti vlivu zmíněných faktorů a případný návrh sjednocení těchto podmínek.

V teoretické části jsou rozebrány mechanicko-fyzikální a geometrické vlastnosti přízí a multifilů. V jednotlivých kapitolách se pokusíme odůvodnit vliv těchto vlastností na tvar a průběh tahové křivky. V závěru teoretické části je snaha nastínit a rozebrat dosavadní výzkum na téma vliv rychlosti deformace na mechanické vlastnosti vysoce pevných přízí a multifilů a podat stručné shrnutí výsledků jednotlivých prací.

V praktické části jsou uvedeny výsledky měření podle firemních norem pro použité materiály. Základem měření je tahová zkouška, která nám poskytne údaje o měřeném materiálu spolu s tahovou křivkou. Měření bude probíhat na trhacím přístroji Testometric M350 – 5 CT. Zaměříme se zde hlavně na vliv rychlosti deformace a upínací délky na mechanické vlastnosti (pevnost, tažnost, počáteční modul, práce do přetrhu) vysoce pevných materiálů (multifil z Kevlaru, příze z Kevlaru a multifil z Twaronu). Naměřená data budou vyhodnocena statistickou dvoufaktoremovou analýzou rozptylu (ANOVA), která zodpoví otázku významnosti vlivu určitého faktoru.

2 Teoretická část

Na začátku teoretické části se pokusíme podat základní informace o mechanicko-fyzikálních vlastnostech multifilů a přízí a provedeme teoretický rozbor tahové pracovní křivky pro jednotlivé materiály.

2.1 Příze

Příze je délkovou textilií, která zaujímá důležitou roli poloproduktu v textilní výrobě jako je například výroba tkanin, pletenin. [20] Díky širokému poli využití přízí jsou na ně kladeny rozdílné požadavky a tedy očekávány různé vlastnosti.

Skládá se ze spřadatelných vláken. Vlákná bývají spojena zakrucováním nebo adhezí a při jejich porušení dochází k přetrhu jednotlivých vlákenných složek. [24]

2.2 Multifil

Multifil se definuje jako délková textilie z více nekonečných chemických vláken, která může být hladká nebo tvarovaná. [3]

2.3 Vysoce pevné materiály

Vysoce pevné materiály řadíme do skupiny speciálních materiálů z důvodu jejich vlastností. Tyto vlastnosti se výrazně liší oproti konvenčním materiálům. Bývají využívány jak pro výrobu oděvních výrobků, tak pro technické textilie.

Do skupiny vysoce pevných vláken patří keramická vlákna, uhlíková vlákna, para – aramidy, polyolefiny, skleněná vlákna, kovová vlákna, . . . Díky svým specifickým vlastnostem jsou často používána především k technickým účelům (kompozity, neprůstřelné vesty, vysoce pevné pásky, tažná lana, nehořlavé textilie pro hasiče). [9]

2.3.1 Kevlar

Jak již bylo výše zmíněno, existuje několik druhů vysoce pevných vláken, a do skupiny para – aramidů se zařazuje právě Kevlar od společnosti DuPont. Ten díky své chemické struktuře dosahuje vysoké mechanické pevnosti a také značné tepelné odolnosti. Původním účelem využití měla být náhrada oceli ve výztuze pneumatik, v současné době ho nalézáme všude tam, kde je zapotřebí vysoce pevného materiálu.



Obrázek 2.1: Kevlar. [22]

Jeho výroba spočívá v navíjení pevného vlákna z kapalného roztoku. Umožňuje to iontová složka reakční směsi (chlorid vápenatý), ta se váže na vodíkové můstky amidové skupiny, a organické rozpouštědlo (N-methylpyrolidon). Z chemického hlediska dochází k syntéze z monomeru para-fenylendiaminu a tereftaoyl chloridu kondenzací, jako vedlejší produkt vzniká kyselina chlorovodíková. Vzniklá kapalina se protlačuje tryskou, prochází vzduchovou štěrbinou až do srážecí lázně. Poté dochází ke zvlákňování za teploty 300 – 400 °C. Vyrobený materiál má vlastnosti tekutého krystalu s polymerovými řetězci orientovanými ve směru vlákna. Výroba kevlaru je obtížná, protože během procesu výroby se používá i jedovatá koncentrovaná kyselina sírová, která je nutná pro udržení roztoku jinak ve vodě nerozpustného polymeru v průběhu syntézy a soukání.



Obrázek 2.2: Ukázka použití Kevlaru (rukavice odolné proti prořezu).

Mezi hlavní nevýhody patří nízká odolnost v tlaku, citlivost na UV záření, rozklad v zásaditém prostředí. Je to antikorozní materiál, s vysokým modulem pružnosti, jeho hustota je $1,44 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Rozlišuje se několik typů Kevlaru například Kevlar AP, Kevlar 29, Kevlar 49, atd. Kevlar nalézá uplatnění v mnoha oblastech, od sportovního vybavení až po původní použití - výztuhy pneumatik. [9] [4] [22]

2.3.2 Twaron

Stejně jako Kevlar je Twaron součástí skupiny para-aramidových vláken, výrobcem je japonská firma Teijin. Původně byl tento materiál vyráběn v Holandsku firmou AKZO pod názvem Arenka, po prozkoušení byl vzat do průmyslové výroby a posléze se přejmenoval na Twaron, kdy ho převzala do výroby firma Teijin.

Způsob jeho výroby je obdobný s výrobou Kevlaru - dochází ke zvlákňování polymeru. Jeho ceněnými vlastnostmi jsou vysoká pevnost v tahu, tepelná odolnost, vysoký modul pružnosti, nevýhodami jsou citlivost na UV záření a na vlhkost. Hustota má pro Twaron stejnou hodnotu jako pro Kevlar $1,44 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Použití je opět totožné s kevlarovými vlákny – při výrobě výztuží pneumatik, lana, lodní plachty, ochrana proti střelám, atd. [27] [21]



Obrázek 2.3: Twaron.



Obrázek 2.4: Ukázka použití Twaronu (tažné lano).

2.4 Geometrické vlastnosti přízí

Mezi základní geometrické vlastnosti přízí se řadí jemnost T , zákrut příze Z , zaplnění μ a také průměr příze D .

2.4.1 Jemnost

Jemnost se vyjadřuje délkovou hmotností, tj. vztah mezi hmotností a délkou délkové textilie v jednotkách $\frac{\text{g}}{\text{km}}$. Nejvíce využívanou metrickou jednotkou pro jemnost je tex ($\frac{\text{g}}{\text{km}}$), používají se také jeho násobky či podíly, např. dtex ($\frac{\text{g}}{10\text{km}}$). [3] [19] Jemnost vypočítáme ze vztahu:

$$T = \frac{m}{l} = \frac{V \cdot \rho}{l} = \frac{S \cdot l \cdot \rho}{l} = S \cdot \rho \quad (2.1)$$

Kde V je objem vláken [m^3], ρ je měrná hmotnost (hustota) vláken [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$], S je souhrnná plocha vláken příčného řezu [m^2] – substanční průřez příze.

2.4.2 Průměr a zaplnění

Při výpočtu průměru příze lze použít idealizovaný model, ve kterém se vychází z představy homogenního válce bez vzduchových mezer. Takto definovaný průměr příze nazýváme substanční průměr D_s a je to nejmenší idealizovaný průměr příze. [11] Vztah pro vypočtení je:

$$D_s = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot T}{\pi \cdot \rho}} \quad (2.2)$$

Ve skutečnosti příze ale není homogenní válec, v její struktuře se nachází vzduchové prostory mezi vlákny, také uspořádání vláken s ohledem na hustotu stěsnání není rovnoměrné a řez příze není úplně osově souměrný. Nenalezneme tak žádnou jednotnou definici průměru příze D . Nicméně vztah mezi substančním průměrem příze D_s a průměrem příze D je $D > D_s$. [20] [11]

Z poznatků o průměru příze je známo, že mezi vlákny v přízi se nachází vzduchové mezery, které jsou způsobené tuhostí vláken a jejich nerovností. Hodnotu, vystihující tento stav, nazýváme zaplnění μ . [25] Zaplnění je bezrozměrná veličina, která leží v intervalu $< 0; 1 >$. [20] Lze ho vyjádřit dvěma způsoby a to objemovou nebo plošnou interpretací. Pro objemovou interpretaci platí podíl objemu vláken V_v [m^3] a celkového objemu příze V_p [m^3].

$$\mu = \frac{V_V}{V_p} \quad (2.3)$$

Pro plošnou interpretaci je dán poměr souhrnné plochy řezných plošek jednotlivých vláken S [m²] ku celkové ploše průřezu přízí S_c [m²]. [20]

$$\mu = \frac{S}{S_c} \quad (2.4)$$

Díky znalosti zaplnění je možné vypočítat průměr příze.

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi \cdot \mu}} = \sqrt{\frac{4 \cdot T}{\pi \cdot \rho \cdot \mu}} \quad (2.5)$$

2.4.3 Zákrut

Zákrut příze Z je počet otáček vztažených k jednotkové délce. Udrží pohromadě a na základě vzniklých třecích sil mezi vlákny jí udává mechanické vlastnosti (pevnost, tažnost, ...). [25] Rozlišujeme dva typy zákrutu podle směru otáčení, a to levotočivý označovaný písmenem S a pravotočivý, který se značí písmenem Z.

Pro hrubší délkové textilie se uplatňuje Koechlinův zákrutový koeficient α [m⁻¹ktex^½].

$$\alpha = Z \cdot T^{\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

Phrixův zákrutový koeficient a [m⁻¹ktex^⅔] se využívá převážně pro jemnější příze.

$$a = Z \cdot T^{\frac{2}{3}}. \quad (2.7)$$

2.4.4 Poissonův poměr

Poissonův poměr charakterizuje deformační chování vláken. Je dán vztahem:

$$v = \frac{\text{příčné zkrácení}}{\text{podélné prodloužení}} = -\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon}, \quad (2.8)$$

$$\varepsilon_T = \frac{S - S_0}{S_0}, \quad (2.9)$$

kde S je plocha průřezu vlákna po deformaci a S_0 je původní plocha vlákna.

Díky Poissonovu poměru je možné určit změnu objemu původního vlákna V_0 a objemu deformovaného vlákna V .

$$\frac{V}{V_0} = (1-v \cdot \varepsilon)2 \cdot (1 + \varepsilon) \approx (1-2v) \cdot \varepsilon. \quad (2.10)$$

Pro většinu textilních vláken platí $0,2 \leq v \leq 0,45$. [19]

2.4.5 Délka vláken

Délka se svou definicí řadí také ke geometrickým vlastnostem textilií. Konkrétně délka vláken je důležitou vlastností textilních útvarů, udává totiž možnosti následného zpracování a rozhoduje o využití pevnosti vláken v pevnosti příze. Definovat ji lze jako vzdálenost konců napřímeného vlákna, bez obloučků a bez napětí.

Změřit délku vlákna můžeme metodou přímou, ve které se měří délky jednotlivých vláken, nebo metodou nepřímou, kde se měří délka ze souboru vláken prostřednictvím hmotnosti ve třídách, prosvěcováním třásně, ohmatáváním třásně atd.

Délka vláken je nestejnomořná, proto je nutné pro její stanovení znát charakteristiky rozptylu. Důležitá jsou také grafická znázornění statistického rozložení délek vláken v surovině, což jsou staplové diagramy.

Jak bylo zmíněno výše, délka vláken ovlivňuje pevnost příze a to tím způsobem, čím jsou vlákna delší, tím je větší pevnost příze. Zajišťují více mezivláknenných kontaktů, které tak způsobují větší soudržnost příze. [18]

2.4.6 Počet vláken v příčném řezu

Počet vláken v průřezu příze vyjadřuje vztah

$$n = k_n \cdot \tau, \quad (2.11)$$

kde k_n je součinitel korekce počtu vláken, τ je poměrná jemnost příze (podíl jemnosti příze a jemnosti vlákna).

Součinitel k_n udává míru sklonu vláken k ose příze. Pokud jsou vlákna rovnoběžná, velikost tohoto součinitele odpovídá číselné hodnotě 1. Rovnice pro výpočet součinitele korekce počtu vláken je:

$$k_n = \frac{S}{S^*}, \quad (2.12)$$

kde S je plocha příčného řezu vlákna, S^* je střední velikost řezné plochy vlákna. Počet vláken v příčném řezu příze je menší než hodnota poměrné jemnosti. [20]

2.4.7 Technologie výroby

Příze jsou konstruovány různými způsoby, snahou je zajistit přízi požadovaných vlastností, ať už jsou použita vlákna přírodního nebo chemického původu. Přádelny pro zpracovávání vlákenné suroviny můžeme rozdělit na bavlnářské, vlnářské a lnářské. Vypřádané příze mohou být různého charakteru, mykané, česané, poločesané, rotorové, odpadové, atd. Liší se mnoha vlastnostmi jako je jemnost, druh použitého materiálu, pevnost, stejnoměrnost.

Bavlnářské příze mohou být ze 100% bavlny nebo směsi bavlny s chemickými vlákny. Patří mezi ně příze mykané, česané a bezvřetenové rotorové příze.

Vlnářské příze jsou složené ze 100% vlny nebo ze směsi vlny, přírodních a chemických vláken. Dělí se na příze mykané, česané, poločesané, bezvřetenové rotorové příze, odpadové (vigoňové) příze. Poločesané a bezvřetenové rotorové příze se skládají převážně ze 100% chemických vláken (příze v experimentální části)

Lnářské příze se vyrábí ze 100% lněných vláken nebo jejich směsí s chemickými vlákny. Rozlišujeme příze česané – z vochlovaného lnu (lenka), mykané (koudelka), česanou koudelku. [3]

Je samozřejmé, že typ výrobní technologie příze má velký vliv na jeho mechanicko-fyzikální vlastnosti (pevnost, tažnost).

2.5 Mechanické vlastnosti přízí

Mechanickými vlastnostmi je nazýváno chování přízí způsobené vnějšími silami. [25]

Je možné je rozdělit podle účinku vnějších sil a to na deformační a destrukční. V případě deformačních účinků se jedná především o elastické, viskoelastické a plastické deformace, do destrukčních účinků lze zařadit vlastnosti jako je pevnost, tažnost nebo odolnost v oděru. [2]

Namáhání můžeme rozdělit podle směru působící síly na jednoosé (tah, tlak), kterým se zabýváme v této práci, a víceosé (krut, ohyb). Na základě časového průběhu namáhání rozlišujeme děj statický a dynamický a řídíme-li se opakováním, rozeznáváme proces prostý a cyklický. [25]

Mechanické vlastnosti jsou také samozřejmě závislé na mechanických vlastnos-

tech vláken a charakteru vlákenného polymeru, jeho zvlákňování, dloužení a fixaci. [20]

Z těchto informací lze tedy usoudit, že mechanické vlastnosti jsou nedílnou součástí následného zpracování vláken a přízí, tudíž se řadí mezi zpracovatelské vlastnosti.

2.5.1 Jednoosé zatěžování

Jednoosým namáháním nazýváme tahové nebo tlakové působení jednosměrné síly na vzorek. Odezvou tahového zatížení je pevnost v tahu.

Po zatížení vzorku dochází k jeho deformaci a ke změně parametrů až do okamžiku přetrhu nebo rovnováhy mezi deformací a vyvozeným napětím.

Měření probíhá na speciálních trhacích přístrojích. [18] [26]

2.5.1.1 Vybrané metody měření mechanických vlastností

Pro měření mechanických vlastností délkových textilií byly vyvinuty trhací přístroje tzv. dynamometry. Jejich rozvoj se rozděluje do dvou směrů a to na přístroje s pohyblivými oběma čelistmi (kyvadlový systém) a na přístroje s pevnou jednou čelistí. [25] [12]

Přístroje s konstantním pohybem příčnicku

Zatížení je zde vyvoláno jednou z čelistí, přičemž druhá vytváří rovnoměrný pohyb. Ta, kterou je vyvoláno zatížení, se pohybuje tak, že ovládá měřící mechanismus zatížení a to tím způsobem, že přírůstek zatížení nebo deformace není konstantní, závisí na deformačních vlastnostech zkoušeného materiálu.

Tento typ měření byl využíván hlavně u starších modelů trhacích přístrojů. Jedná se o přístroj s padajícím kyvadlem, které vytváří zmíněné zatížení. Měřítkem pevnosti materiálu je pak úhel při destrukci vzorku.

Přístroje s konstantním přírůstkem deformace

U těchto přístrojů dochází k posuvu jedné čelisti konstantní rychlostí, tím se vytvoří určité napětí ve vzorku.

$$v_{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}. \quad (2.13)$$

Kde v_{ε} je rychlost deformace, $d\varepsilon$ je přírůstek prodloužení, dt je přírůstek času. Pokud pro rychlost pohybu příčnicku platí vztah

$$v_{pr} = \frac{d\Delta l}{dt}. \quad (2.14)$$

Tak můžeme vzorec pro rychlost deformace upravit a dostáváme závislost na upínací délce a rychlosti pohybu příčnicku

$$v_\varepsilon = \frac{d(\frac{\Delta l}{l_0})}{dt} = \frac{d\Delta l}{l_0 dt} = \frac{v_{pr}}{l_0}. \quad (2.15)$$

Vzhledem ke konstrukci měřících členů deformace a síly, která umožňuje spojení mezi měřícím přístrojem a výpočetní technikou, bývá tento typ v současnosti nejvíce využíván. Počítač snímá a zapisuje signál, lze ho použít i jako řídicí jednotku, navolit příslušný program a tím stroj uvést do automatického chodu. Program požadovaná naměřená data zpracuje a vyhodnotí (průměrné hodnoty pevnosti, tažnosti, deformace, ...). [25] [12]

Tento typ přístroje patří mezi nejvíce využívané v dnešní době, byl použit i pro experimentální měření této práce.

Přístroje s konstantním přírůstkem zatížení

Zde dochází k růstu zatížení rovnoměrně v čase, vzorek se může svévolně deformovat. [28]

Podmínky měření

Pro každý materiál jsou výrobcem stanoveny normy, nebo je použito mezinárodní normy ČSN EN ISO 2062, které charakterizují a udávají způsob a podmínky měření mechanických vlastností délkových textilií.

Dle normy poskytnuté firmou Teijin je nutné vzorky testovat v klimatizovaném prostředí s teplotou vzduchu 20 ± 2 °C a relativní vlhkostí 65 ± 2 %. Měření se provádí na přístroji s konstantním přírůstkem deformace, který je opatřen čelistmi s možností opásání. Velikost upínací délky je uvedena 500 ± 1 mm a rychlost pohybu příčnicku 250 ± 10 mm·min⁻¹. Z jednoho návínu se přeměřuje 5 vzorků.

Norma ČSN EN ISO 2062 platí pro nitě v návínech, používá se pro měření pevnosti a tažnosti vzorků na trhačím přístroji s konstantním přírůstkem deformace. Přístroj musí obsahovat vhodný typ čelistí. Povoleno jsou dvě upínací délky, 500 mm s rychlostí příčnicku 500 mm·min⁻¹, výjimečně 250 mm, které odpovídá rychlosti příčnicku 250 mm·min⁻¹. Počet měření je stanoven minimálně na 50, pokud potřebujeme zjistit kromě středních hodnot i variační koeficient, pak se počet měření zvýší na 200.

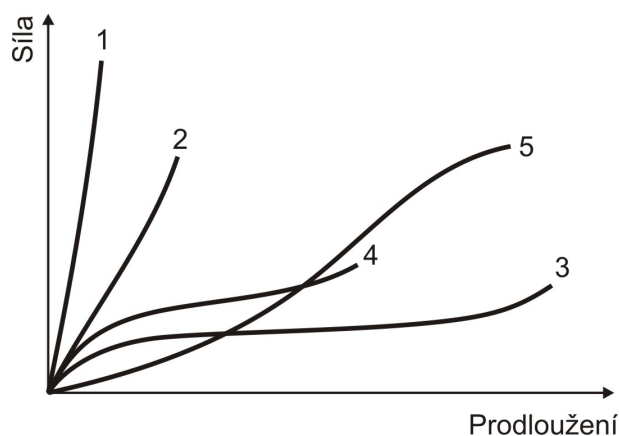
2.5.2 Tahová pracovní křivka

Výsledkem měření na zmíněných přístrojích (za daných podmínek) je tahová křivka.

Graf závislosti tahové síly a prodloužení příze nazýváme tahovou nebo také pracovní křivkou, jak už bylo řečeno. Používáme ji pro srovnání mechanického chování v celém procesu zatěžování. [28]

Vzhledem k tomu, že hodnoty pevnosti a tažnosti nejsou dostatečnou charakteristikou vlákna, je nutné sledovat průběh celé tahové křivky až do přetrhu, ze které posléze lze vyčíst hodnoty specifických bodů. Tyto hodnoty se následně dosadí do vztahů pro výpočty potřebných charakteristik. [25]

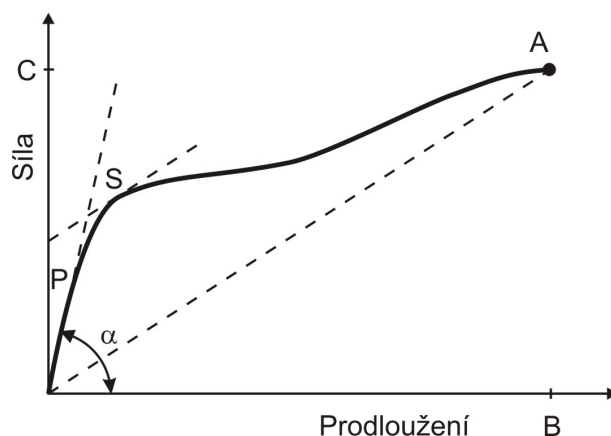
Z uvedeného tahového diagramu 2.5, kde se nachází pracovní křivky vláken různých materiálů, si můžeme lépe představit rozdílné vlastnosti vláken.



Obrázek 2.5: Tahové křivky různých vláken (1 - len, 2 - bavlna, 3 - vlna, 4 - viskózové hedvábí, 5 - polyamid 66) [19].

2.5.2.1 Rozbor tahové křivky

Na obrázku 2.6 je zobrazen graf tahové křivky, ve kterém jsou uvedeny některé jeho specifické body.



Obrázek 2.6: Specifické body tahové křivky.

Popis obrázku 2.6:

0 – počátek

0-P – oblast pružných deformací, deformace se po uvolnění napětí vrátí

P – mez pružnosti – nad tímto bodem dochází k trvalé deformaci

S – počátek kluzu

A – mez pevnosti (přetrh)

B – prodloužení při přetrhu

C – pevnost při přetrhu

Mez pružnosti

Mezí pružnosti bývá označováno mezní napětí, které ještě nevyvolává trvalou deformaci. Po jeho překročení dochází k již nevratnému poškození materiálu. Na obrázku je mez pružnosti označena písmenem P, oblast 0 až P je oblastí pružné deformace, to znamená, že proběhlé deformace by měly být vratné a časově nezávislé. Pro namáhání v mezích pružnosti platí Hookův zákon (za předpokladu malých sil a malých deformací),

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.16)$$

kde σ [Pa] je napětí, E je Youngův modul pružnosti [Pa], ε je poměrné prodloužení. Poměrné prodloužení je bezrozměrná veličina, která je popsána vztahem:

$$\varepsilon = \frac{(l - l_0)}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.17)$$

Mezi pružnou a plastickou deformací nelze nalézt ostré rozhraní, jelikož k plas-

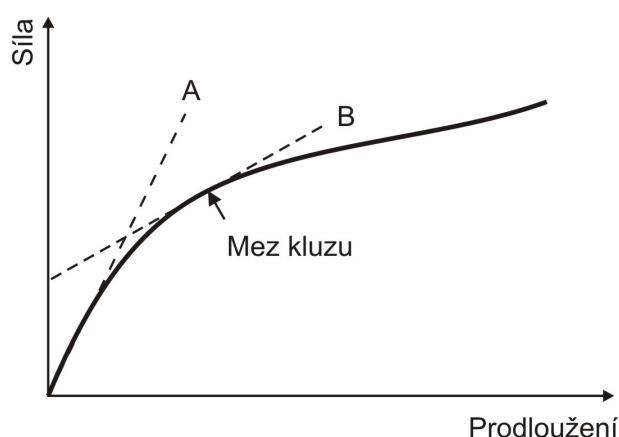
tické deformaci dochází už při nepatrném zatížení, nemůžeme proto mez pružnosti experimentálně určit. Definujeme ale určitou konvenční mez pružnosti, která odpovídá hodnotě napětí, které způsobí malou deformaci (např. 0,05% nebo 0,01%). [23] [14] [7]

Mez kluzu

Závisí především na materiálu, před dosažením této meze dochází k elastickým deformacím (po odlehčení se vzorek vrátí do původního stavu). Pokud dojde k překročení meze kluzu, zvětší se relativní prodloužení, aniž by se zvětšovalo zatížení. Materiál se prodlužuje bez zvětšující se síly, dochází k tzv. tečení, přičemž se mění fyzikální vlastnosti materiálu. Není možné nalézt zcela pevnou hranici mezi elastickou a neelastickou částí křivky. Existují čtyři způsoby definování meze kluzu. [28] [16]

Prahový sklon

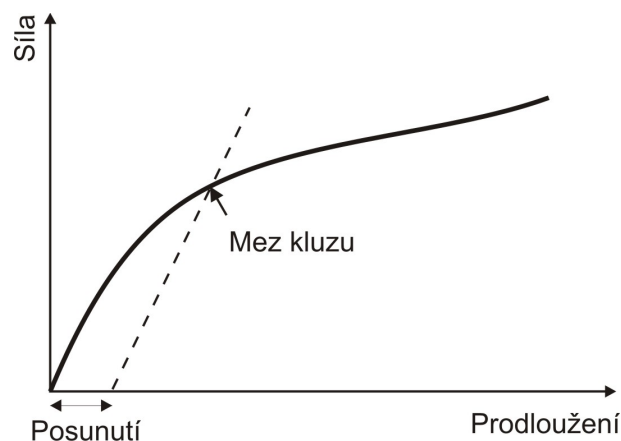
Udává sklon lineární části tahové křivky nacházející se v počáteční části grafu, na obrázku značeno A. Oblast, která klesá od bodu zlomu (tečna B) vzhledem k lineární části, se nazývá mez kluzu. [28]



Obrázek 2.7: Nalezení bodu meze kluzu prahovým sklonem.

Vyrovňovací mez kluzu

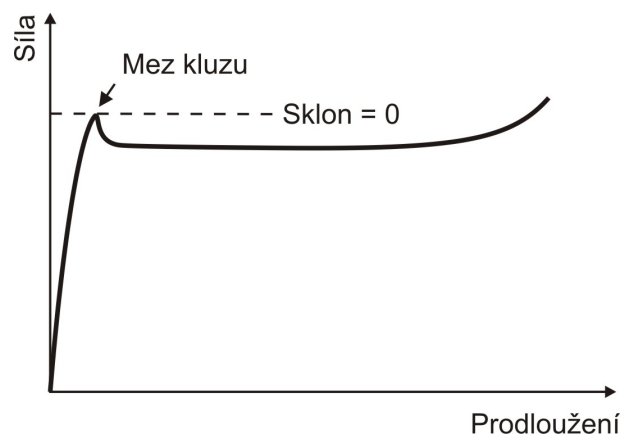
Mez kluzu se v tomto případě nachází na průsečíku tahové křivky s přímkou, která je rovnoběžná s počáteční lineární oblastí a je posunuta o určitou smluvní hodnotu prodloužení. [28]



Obrázek 2.8: Nalezení bodu meze kluzu metodou vyrovnávací mezí kluzu.

Metoda nulového sklonu

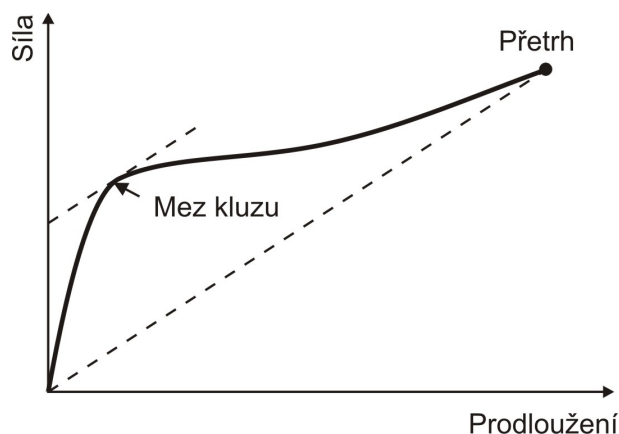
Tuto metodu můžeme použít pouze na určitý typ materiálu, který má specifický tvar pracovní křivky. Je nutné, aby křivka byla velmi strmá, protože hledáme bod na křivce, ve kterém má křivka sklon blízký k nule nebo je nulový. Tento bod pak značí mez kluzu. [28]



Obrázek 2.9: Nalezení bodu meze kluzu metodou nulového sklonu.

Mereditova konstrukce

Mereditova konstrukce je dalším způsobem nalezení meze kluzu. Zde se nejprve vytvoří přímka spojující počátek s bodem přetrhu, následně pak rovnoběžka protínající tahovou křivku, kde průsečíkem je mez kluzu. [28]



Obrázek 2.10: Nalezení bodu meze kluzu metodou Mereditovy konstrukce.

Mez úměrnosti

Do meze úměrnosti platí, že deformace je úměrná zatěžující síle, tudíž část grafu odpovídající této oblasti je přímková. Je ji tedy možné popsat zmíněným Hookovým zákonem. Jedná-li se zde o deformaci pružnou a časově nezávislou, lze teoreticky říci, že mez úměrnosti je stejná s mezí pružnosti. Pro vlákna obecně platí velmi nízká deformace vzhledem k mezi úměrnosti. [23] [10]

Mez pevnosti

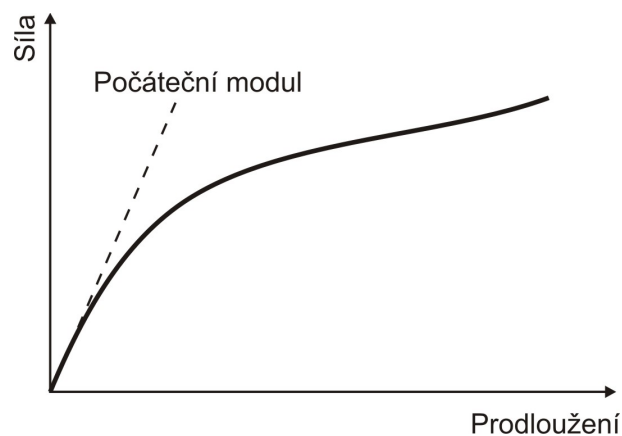
Při mezi pevnosti dochází k destrukci materiálu, což znamená, že se materiál přetrhne.

Moduly – počáteční modul pružnosti, tangentový modul, sekantový modul

Průběh pracovní křivky popisují některé běžně používané moduly, jako jsou počáteční modul pružnosti, tangentový modul pružnosti, sekantový modul. [25] Modulem nazýváme sklon počáteční lineární oblasti, lze z něj vyčíst míru tuhosti materiálu (odpor proti prodloužení). V podstatě čím vyšší je modul, tím větší odpor má k prodloužení.

Počáteční modul

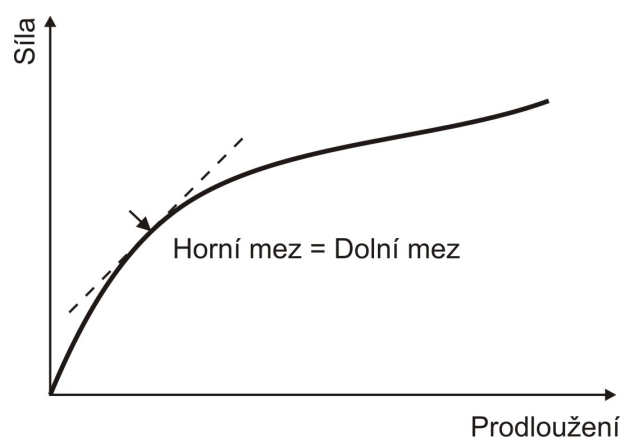
Počáteční modul pružnosti je tečna ke křivce procházející počátkem, jinak řečeno první derivací funkce pracovní křivky. Nejčastěji se znázorňuje graficky do tahového diagramu, kde ho určuje strmost průběhu křivky při nulové deformaci. (obrázek) [23]



Obrázek 2.11: Počáteční modul tahové křivky.

Tangentový modul

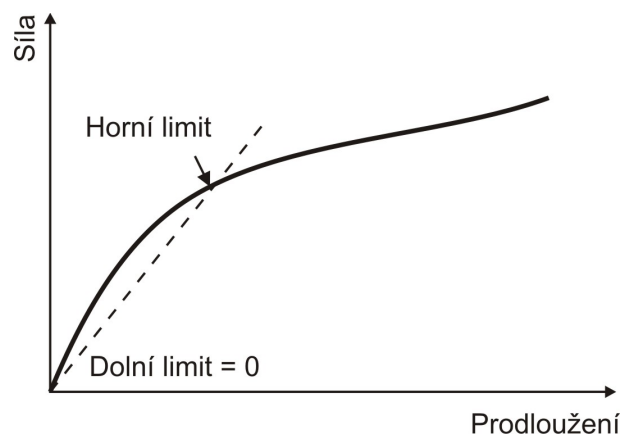
Tento modul je charakterizován také strmostí tahové křivky ovšem při nenulové deformaci. Podle obrázku jde o sklon tečny v určitém bodě pracovní křivky. [28]



Obrázek 2.12: Tangentový modul tahové křivky.

Sekantový modul

Na pracovní křivce definujeme i sekantový modul, je to sklon přímky, který nalezneme spojením dvou bodů na křivce, z čehož jeden bod je v počátku. Měří se jako hodnota prodloužení při určité síle a naopak. [28]



Obrázek 2.13: Sekantový modul tahové křivky.

Práce do přetrhu

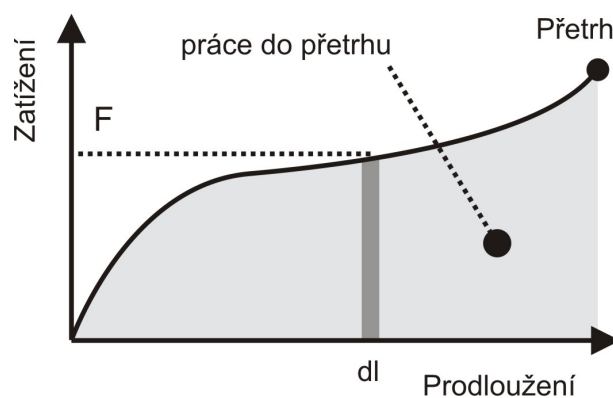
Definuje se jako celková energie potřebná k přetrhu materiálu a do jaké míry je materiál poddajný. [19] Vezmeme-li v úvahu malý úsek z pracovní křivky na obrázku, působí zde konstantní síla F , která prodlouží materiál o malý úsek dl , pak vykonaná práce je Fdl . Celková práce do přetrhu je potom dána vztahem

$$W = \int_0^{\text{přetrh}} F dl \quad (2.18)$$

Kde W je celková práce do přetrhu [J].

Vedle toho se zavádí specifická deformační práce, kterou vypočteme ze vztahu

$$\text{Specifická deformační práce} = \frac{\text{práce do přetrhu}}{\frac{\text{hmotnost}}{\text{jednotková délka}} \cdot \text{upínací délka}} \quad (2.19)$$



Obrázek 2.14: Výpočet deformační práce z tahové křivky.

2.5.3 Ultimatívni charakteristiky

Mechanické vlastnosti popisují tzv. ultimatívni charakteristiky (namáhání do přetrhu).

- Pevnost – síla do přetrhu P [N],
- Napětí do přetrhu σ [Pa]
- Protažení do přetrhu Δl [mm] – protažení odpovídající síle v okamžiku přetrhu
- Tažnost ε [%] - deformace do přetrhu
- Relativní pevnost F [N/tex], resp. [cN/dtex] – síly potřebné k přetržení vzorku přepočtené na plochu průřezu nitě. Plocha se zde obtížně stanovuje, proto se síla přepočítává na délkovou hmotnost – jemnost [tex].
- Tržná délka l_T [km], resp. [m] – délka, při níž by se textilie zavěšená na jednom konci přetrhla vlastní tíhou [18]

2.5.3.1 Pevnost a tažnost

Pevnost a tažnost jsou základními mechanickými charakteristikami a jejich hodnoty patří mezi nejčastěji využívané. Předmětem zkoumání bývá vztah mezi silami a deformacemi při konstantní rychlosti růstu zatížení nebo při konstantním prodloužení. Měření probíhá především na dynamometrech (trhací přístroje) různých typů. Výsledným grafem závislosti tahové síly a prodloužení je tahová (pracovní) křivka.

Působením vzrůstajícího zatížení dochází k postupné deformaci délkové textilie a následnému přetrhu (destrukci). V okamžiku přetrhu vyjadřuje hodnota tahové síly pevnost. Pro vyrovnání nerovnoměrností lze využít tzv. předpětí, tzn. zatěžování délkové textilie malou základní silou před vlastní zkouškou. [20][19]

Míra požadované pevnosti záleží především na finálním využití, proto se v této hodnotě textilní materiály liší. Například u přízí pro průmyslové produkty je nutná větší pevnost. Pokud chceme dosáhnout vysoko – pevnostního výrobku, je možné místo přírodních vláken použít syntetické. [28]

Získané ultimatívni hodnoty jsou závislé na podmínkách měření, jako je upínací délka, rychlost deformace.

V této části se nachází teoretické poznatky převážně z oblasti vlivu zákrutu na pevnost a tažnost příze a multifilu, byly zvoleny z důvodu uvedení rozdílů mezi namáháním příze a multifilu.

Tažnost multifilu

Zákrut svazku nekonečných vláken má velký vliv na tažnost, přesto není zcela jednoznačný, důvodem jsou charakteristiky zvoleného materiálu.

Vliv zborcení, deformace a migrace vláken na tažnost multifilu

Pro zkoumání těchto vlivů musíme zavést určité předpoklady. Předpokládejme tedy, že vlákna nemigrují, všechna jsou zakroucená do šroubovice. Zakroucení do šroubovicového tvaru znamená větší tlak na vnější vlákna, která opisují delší dráhu na větším poloměru než vlákna uložená ve středu svazku, ta jsou téměř rovná, nepůsobí na ně žádný tlak.

Při uvolnění zákrutu na svazku může dojít ke dvěma extrémním situacím. První situací je možnost dokonale elastických vláken, kdy se vlákna na vnější straně zkrátí na svoji původní délku, kterou měly před zakroucením svazku, tím dojde ke zborcení (zacuchání) vnitřních vláken. Další možností jsou dokonale plastická vlákna, kde vlákna vlivem zákrutu zůstávají ve svém zdeformovaném stavu. Mezi těmito dvěma extrémními situacemi se nachází stav migrace vláken, nedochází zde ke zborcení ani deformaci vláken. Výsledným vztahem tažnosti multifilu pro tuto strukturu je

$$\varepsilon_y = (1 + \varepsilon_b)C_y \cos \beta_b - 1 \quad (2.20)$$

kde ε_y je tažnost multifilu, ε_b je tažnost filamentu, C_y značí faktor seskání, β_b je úhel sklonu povrchového vlákna zakrouceného svazku. Pokud by docházelo k migraci vláken, která vzniká vlivem zakrucování (různé tlaky mezi vnějšími a vnitřními vlákny), nebylo by možné použít šroubovicový model. Probíhá zde tzv. efektivní migrace, v multifilu je celkové napětí velmi nízké, nenastává tak plastická deformace vláken, ani zborcení vnitřních filamentů. Výsledná tažnost je tedy konstantní, nezávisí na zákrutu multifilu (na počátečním úhlu sklonu vnějších vláken).

Obecně lze říci, že vyšší tlak vznikající při zakrucování a šířící se rovnoměrně v celém průřezu multifilu po uvolnění způsobí kombinaci seskání a plastické deformace. Seskání multifilu zapříčiňuje zborcení vnitřních vláken a vyšší tažnost celého multifilu, zatímco plastická deformace má na svědomí nižší tažnost multifilu. O tom, co se s multifiem stane, rozhoduje poměr těchto efektů, ty závisí na elastických vlastnostech vláken. [28]

Pevnost multifilu

Na pevnost multifilu má velký vliv zákrut, čím vyšší je zákrutový koeficient, tím nižší pevnost multifil má.

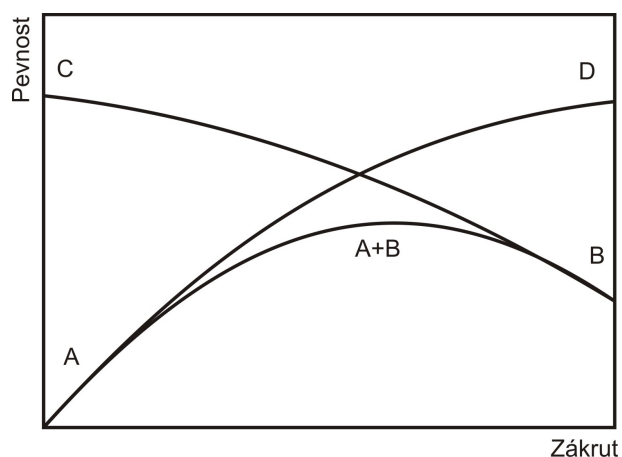
Zpočátku se zákrutem pevnost multifilu vzrůstá, dochází zde k vyrovnávání slabších míst ve vláknech, následně však pevnost klesá. Tento pokles způsobuje změna sklonu vláken k ose svazku, kdy síla ve filamentech má rozdílný směr oproti síle, která působí v celém svazku. [28]

Tažnost příze

Tažnost příze spolu se zákrutem kontinuálně roste.

Pevnost příze

Setkáváme se s více pojetími pevnosti příze. Tradičním přístupem je tvrzení říkájící, pevnost příze se zvyšujícím se zákrutem roste až do určité hodnoty, od té následně pevnost klesá (stejně jako u multifilu, způsobeno sklonem vláken). Zde platí, pokud má příze nulový zákrut, nemá žádnou pevnost. Rostoucí zákrut způsobuje větší odpor proti prokluzu staplových vláken a také větší sevření vláken. Tento přístup není považován za zcela správný, protože vlákna nelze rozdělit pouze do dvou skupin, na vlákna, která prokluzují a vlákna, která neprokluzují. [28]



Obrázek 2.15: Pevnost a kluz vláken při přetrhu příze z [25].

Popis obr. 2.15:

A - všechna vlákna klouzají; B - všechna vlákna se trhají; C - odolnost proti přetrhu; D - odolnost vůči kluzu; A + B - kombinace kluzu a přetrhu

Modifikovaný přístup říká, že konce všech vláken prokluzují a že vlákna ve středu svazku jsou sevřena zákrutem. Zákrut zajišťuje sevření vláken již od nízkého stupně, při vyšším stupni jsou vlákna ovlivňována vlákny vedlejšími. Vlivem vyššího zatížení dochází ke zvyšování radiálního tlaku, tím vznikají třecí síly mezi vlákny. Tyto síly

jsou velmi důležité pro zabránění prokluzu vláken. Následkem zmiňovaných efektů se docílí samosvornosti příze. Po vláknech staplové příze se šíří napětí. Dosahuje hodnot od nuly až po hodnotu stejnou s napětím filamentu multifilu.

Napětí je distribuováno od začátku vlákna, kde je hodnota nulová, po hodnotu ve vlákne, která se shoduje s hodnotou napětí filamentu multifilu, následně přechází opět v nulu na konci vlákna. Pro správné šíření napětí je nutné, aby delší vlákna měla nižší stupeň zákrutu. Ale pokud se celkový zákrut příze sníží, vlákna budou prokluzovat. K tomu dojde následkem poklesu zatížení ve vláknech ke kritické hodnotě, tím se v podstatě zničí působící samosvornost a vlákna tak mohou prokluzovat. Zvýšením napětí působení samosvornosti zůstává, až po dosažení maximální hodnoty pevnosti vláken nastává katastrofický přetrh příze.

Na pevnost příze má vliv mnoho dalších faktorů jako jemnost vláken v přízi, zaplnění, technologie výroby atd.

Jemnost vláken ovlivňuje pevnost, jemnější vlákna zajišťují větší pevnost příze. Naopak vlákna s menší jemností dokážou odolávat třecím silám, tudíž mají větší sklony k prokluzu a snižují tak pevnost příze.

Zaplnění má na pevnost vliv v souvislosti s použitým materiálem, nelze tak jednoznačně říct, jak vliv zaplnění funguje. Vzhledem k použitému materiálu pevnost závisí na vnitřní struktuře vlákna.

Je samozřejmé, že velký význam pro pevnost příze má její výrobní technologie. Například česaná příze je pevnější než příze mykaná při stejných parametrech nebo příze prstencová má vyšší pevnost než příze rotorová opět při totožných parametrech. [28]

2.5.4 Faktory působící na průběh průměrné tahové křivky

Faktorů působících na průběh průměrné tahové křivky je mnoho, některé byly zmíněny již výše (technologie výroby, jemnost, zákrut, . . .), další jsou uvedeny v této kapitole.

2.5.4.1 Upínací délka

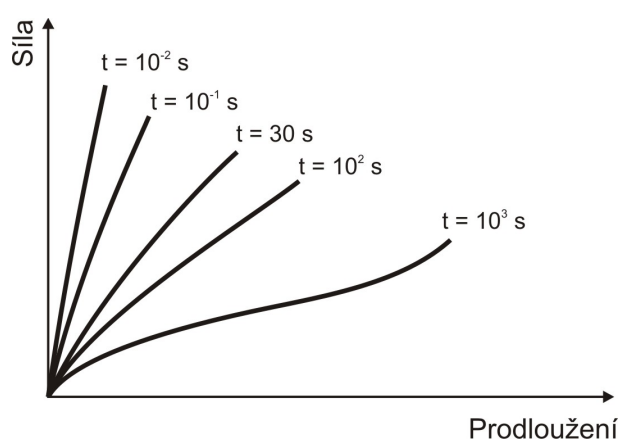
Upínací délku definujeme jako vnitřní vzdálenost mezi čelistmi trhačského přístroje. Má velký vliv na pevnost příze. K přetrhu příze dochází vždy v nejslabším místě zatěžovaného úseku. Proto lze předpokládat, že v dlouhém úseku příze se nachází alespoň jedno extrémně nepevné místo, které bude mít pravděpodobně velmi malou pevnost. Měříme-li krátký úsek, je zde situace opačná. Krátký úsek vůbec nemusí

obsahovat málo pevné místo, a tím bude jeho pevnost velká.

Z této teorie lze obecně vyvodit vliv upínací délky na pevnost příze - s rostoucí upínací délkou klesá průměrná pevnost příze. Tento jev byl potvrzen mnoha experimenty. [20]

2.5.4.2 Rychlosti deformace

Rychlost zatěžování patří také mezi významné faktory ovlivňující měření pevnosti a tažnosti příze. Platí zde - čím rychleji se vlákno deformuje, tím je větší podíl elastické deformace, což znamená, že s růstem rychlosti klesá tažnost a zvětšuje se pevnost. Délková textilie nemá dostatek času k přeskupení vnitřních sil (tření mezi vlákny) a dochází tak k tomuto jevu. [19] [13]



Obrázek 2.16: Závislost pevnosti a tažnosti na rychlosti deformace.

2.5.4.3 Historie zkoušeného vzorku

Dokonce i historie vzorku může mít neblahé následky na mechanické vlastnosti materiálu. Může se například jednat o materiál bělený nebo světlem degradovaný, takový vzorek bude vykazovat nižší hodnoty mechanických charakteristik než původní. Vzorek také mohl být již v minulosti namáhán nad svoji mez kluzu a tím se změnil jeho pevnost i tažnost. [28]

2.5.4.4 Prokluz vzorku v čelistech

K prokluzu vzorku v čelistech dochází při nedostatečném tlaku mezi čelistmi a třením mezi čelistí a materiálem, právě tyto požadavky jsou základem stability upnutí vzorku mezi čelistmi. Stabilita upnutí vzorku tedy závisí na tření mezi čelistí a vzorkem, tlakem mezi čelistmi a šířkou čelistí, která upíná vzorek.

K přetržení materiálu může dojít vlivem ostré hrany čelisti, která snižuje pevnost vzorku. Problémům s přetržením vlivem čelisti lze předejít zvolením vhodného druhu čelistí. Pro tahové zkoušky přízí jsou nejčastěji používány ovíjecí čelisti, které nemají ostré hrany. Dále je možné využít čelisti s gumovým povrchem, ten zajišťuje větší tření mezi čelistí a vzorkem, další výhodou je jeho měkkost. [28]

2.5.4.5 Klimatické podmínky

Klimatické podmínky mohou zásadně ovlivnit mechanické vlastnosti textilií, proto měření probíhá za normovaných klimatických podmínek. To ve většině případů standardního měření znamená teplota vzduchu 20 ± 2 [°C], vlhkost vzduchu 65 ± 2 [%]. Velký vliv má relativní vlhkost především na přírodní vlákna, která ji absorbují ze svého okolí. Tím dochází k jejich bobtnání, což zapříčiňuje změnu mechanických vlastností. S rostoucí vlhkostí se téměř vždy zvyšuje tažnost vláken, ale klesá pevnost, obdobně je to se vzrůstající teplotou, kdy roste podíl plastické deformace. [19]

2.6 Rešerše

Téma vliv rychlosti deformace na mechanické vlastnosti vysoce pevných přízí bylo již v minulosti zkoumáno. V následující části práce budou shrnuty vybrané výsledky dosavadních výzkumů.

Článek [29] řešil vliv rychlosti deformace na mechanické vlastnosti vysoce pevných vláknenných svazků. Použitým materiálem byl Kevlar 49 a hodnoty rychlosti deformace 0,0001; 0,01; 140; 440; 1350 s⁻¹ pro hodnotu upínací délky 8 mm. Experimentální výsledky ukazují závislost maximálního zatížení, počátečního modulu pružnosti a maximálního prodloužení příze na rychlosti deformace – s rostoucí rychlostí deformace rostou i zmíněné vlastnosti.

V práci byl sledován vliv rychlosti deformace na pevnost. Autoři vycházeli z modelu, který vyjadřuje závislost pevnosti na rychlosti deformace vlákna. Pro sestavení modelu platí Hookův zákon pro vztah mezi aplikovaným statickým, nebo dynamickým napětím a prodloužením.

$$\sigma_f^s = E_f^s \cdot \varepsilon_f^s, \quad (2.21)$$

$$\sigma_f^d = E_f^d \cdot \varepsilon_f^d, \quad (2.22)$$

kde E_f je modul pružnosti, σ_f , ε_f napětí a prodloužení vlákna. Index f značí vlákno, s a d kvazi-statické a dynamické zatížení. Dynamický modul pružnosti a prodloužení vlákna při dynamickém zatížení jsou dány vztahem

$$\frac{E_f^d}{E_f^0} = 1 + f\left(\frac{v_\varepsilon}{v_{\varepsilon 0}}\right), \quad (2.23)$$

$$\frac{\varepsilon_f^d}{\varepsilon_f^0} = 1 + \lambda\left(\frac{v_\varepsilon}{v_{\varepsilon 0}}\right), \quad (2.24)$$

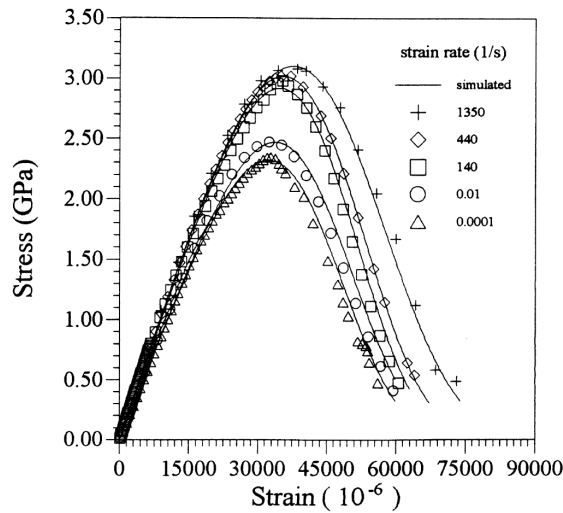
kde v_ε je vstupní rychlost deformace, E_f^0 a ε_f^0 modul pružnosti a prodloužení vlákna při působení rychlosti deformace $v_{\varepsilon 0}$. $f(\frac{v_\varepsilon}{v_{\varepsilon 0}})$ a $\lambda(\frac{v_\varepsilon}{v_{\varepsilon 0}})$ jsou definované jako funkce závislosti rychlosti deformace. Z předchozích vztahů mohu vyjádřit vztah pro pevnost vlákna

$$\sigma_f^d = [1 + f(\frac{v_\varepsilon}{v_{\varepsilon 0}})][1 + \lambda(\frac{v_\varepsilon}{v_{\varepsilon 0}})]\sigma_f^0. \quad (2.25)$$

Distribuce pevnosti vlákna se řídí Weibullovým rozdělením

$$F(\sigma_f) = 1 - \exp[-(\frac{\sigma_f}{\sigma_1})^{m_1} - (\frac{\sigma_f}{\sigma_2})^{m_2}] \quad (2.26)$$

Kde σ_1, σ_2 jsou škálové parametry a m_1, m_2 jsou tvarové parametry. Bylo prokázáno, že m_1 a m_2 nejsou závislé na rychlosti deformace. Následně autoři zobecnili vztahy pro svazek vláken a našli předpis pro funkce f a λ pro referenční rychlost deformace 140 s^{-1} a porovnali teoretický model s naměřenými daty (2.17).



Obrázek 2.17: Srovnání naměřené a teoretické závislosti tahová křivky příze z Kevlaru 49.

Deju Zhu a kol. [31] ve svém článku zkoumá chování jednoduché příze z materiálu Kevlar 49 při rychlosti deformace v rozmezí od 20 do 100 s⁻¹. Byly použity 2 upínací délky kevlarové příze (25 mm a 50 mm). Pro upínací délku 25 mm byly využívány rychlosti deformace 30, 50 a 100 s⁻¹ a pro 50 mm hodnoty rychlosti deformace 20 a 60 s⁻¹. Pro každou upínací délku a rychlost deformace bylo měření opakováno 6x. Měření probíhalo na vysokorychlostním hydraulickém přístroji se servo pohonem a chování při přetrhu zaznamenávala digitální kamera.

Řešil se vliv rychlosti deformace na dynamické vlastnosti jednoduché kevlarové příze – Youngův modul pružnosti, pevnost v tahu, maximální prodloužení, tuhost. Pro obě upínací délky vycházelo, se zvyšujícími se hodnotami rychlosti deformace se zvyšují i hodnoty dynamických vlastností příze.

V článku [30], který navazuje na předchozí práci [31] bylo zkoumáno vlivu upínací délky a rychlosti deformace na mechanické vlastnosti jednoduchých přízí z materiálu Kevlar 49, bylo použito kvazi – statického a dynamického namáhání na různých přístrojích. Dynamickým namáháním bylo zjištěno to, co v předchozím článku [31], tedy že Youngův modul pružnosti, pevnost, prodloužení a tuhost příze se zvyšují se zvyšující se rychlostí deformace (od 20 do 100 s⁻¹). Při kvazi – statickém namáhání se pevnost se zvyšující se upínací délkou snižovala. Vzhledem k náhodným vlastnostem materiálu a datům s nimi spojenými bylo doporučeno využít model založený na statistickém modelu Weibullova rozdělení pro správné vystižení naměřených dat. Chování při přetrhu příze je vysvětleno tak, že v přízi se se zvyšující délkou zvyšuje počet defektů a tím má větší možnost přetrhu.

V práci [5] se zabývali parametry působící na kvazi – statickou a dynamickou pevnost pěti různých aramidových přízí (Kevlar 129, Kevlar KM2, Kevlar LT, Twaron, Zylon). U kevlarových výrobků byla zjištěna omezená závislost pevnosti na rychlosti deformace, zatímco Twaron a Zylon vykazovaly významnou závislost pevnosti na rychlosti deformace. Vliv velikosti vzorku na pevnost byl zkoumán na Kevlaru 129. Testována byla vlákna pěti upínacích délek (5, 16, 25, 50, 100 mm) a multifily tří upínacích délek (24, 100, 170 mm), výsledkem byl vliv upínací délky na pevnost – pevnost se snižuje se zvyšující se upínací délkou.

Vliv upínací délky a rychlosti deformace na pevnost vysoce pevných vláken zkoumali v [15]. Použity byly velikosti upínací délky 2,5; 5,5; 10; 50; 100; 250 mm a rychlosti deformace 0,001; 1; 1500 s⁻¹ pro materiály Kevlar, Kevlar 129 a Twaron. Výsledkem měření bylo - vliv upínací délky na pevnost vláken je nevýznamný. To naznačovalo rovnoměrné rozložení mnoha defektů podél vláken. V této práci se neprojevil vliv rychlosti deformace na pevnost vysoce pevných vláken.

2.7 Analýza rozptylu (ANOVA)

Pro zjištění vlivu rychlosti deformace a upínací délky na pevnost, tažnost, práci do přetrhu a modul pružnosti bude využita analýza rozptylu, kde jedním z faktorů bude upínací délka (faktor A) a druhým rychlost přičníku (faktor B) [1].

Analýzu rozptylu je možné použít jako samostatnou techniku nebo jako metodu, která umožňuje analýzu zdrojů variability v lineární regresi. Její využití je např.:

- Porovnání průměrů více než 2 souborů.
- Určení vlivu způsobu přípravy vzorku (několika způsobů).
- Zpracování mezilaboratorních porovnávacích zkoušek.

Rozlišujeme více druhů analýzy rozptylu a to na základě počtu působících faktorů. Základní je jednofaktorová analýza rozptylu, která určuje vliv jednoho faktoru na vysvětlovanou proměnnou. Dalším typem je dvoufaktorová analýza rozptylu, udávající vliv dvou faktorů.

- Je-li v každé cele jedno opakování – ANOVA bez opakování.
- Je-li v každé cele více než jedno opakování, ale ve všech celách stejný počet – vyvážená dvoufaktorová ANOVA.
- Je-li v každé cele více než jedno opakování a počet ve všech celách je různý – nevyvážená dvoufaktorová ANOVA.

Pro vyhodnocení experimentálních dat v této práci byla zvolena vyvážená dvoufaktorová analýza rozptylu. [8] Pro její výpočet byl zvolen statistický program QC expert.

Podmínky pro použití analýzy rozptylu:

- Nezávislost měření.
- Normalita dat v každé skupině.
- Homogenita rozptylů uvnitř skupin

Základním úkolem analýzy rozptylu je posouzení hlavních a interakčních účinků jednotlivých faktorů na závisle proměnnou. [6]

2.7.1 Dvoufaktorová analýza rozptylu

Anova pro dva faktory je rozšířením jednofaktorové analýzy rozptylu. Dochází zde k experimentům na různých úrovních dvou faktorů A a B . Kombinace těchto úrovní vytváří mřížkovou strukturu (tabulka 2.1), jejím základním prvkem je tzv. cela. Platí, že cela (ij) odpovídá i -té úrovni faktoru A a j -té úrovni faktoru B . V každé cele je n_{ij} opakování.

Tabulka 2.1: Mřížková struktura pro faktory A a B

	B_1	B_2	\dots	B_M
A_1				
A_2		A_2B_2		
\dots				
A_N				

Obecně pro statistický model analýzy rozptylu s opakováním v cele platí vztahy

$$y_{ijk} = \mu_{ij} + \varepsilon_{ijk}, \quad (2.27)$$

$$\mu_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \tau_{ij}, \quad (2.28)$$

kde y_{ijk} je výsledek měření, μ_{ij} je skutečná hodnota výsledků analýzy, ε_{ijk} je náhodná chyba (předpoklad normálního rozdělení). V druhé rovnici je μ celkový aritmetický průměr všech hodnot v matici, α_i je vliv i -té úrovně faktoru A , β_j je vliv j -té úrovně faktoru B a τ_{ij} značí interakci, která vzniká důsledkem různých kombinací řádkových a sloupcových efektů. [1]

2.7.2 Vyvážená dvoufaktorová analýza rozptylu

Analyzuje se vliv dvou faktorů s pevnými efekty na výsledek pozorování. Platí, že v každé cele je $n_{ij} = n$ pozorování. Za odhad μ_{ij} považujeme aritmetické průměry.

Pro následující rovnice odhadů se využívají hodnoty N a M , N je počet sloupců a M je počet řádků v mřížkové struktuře.

$$\hat{\mu} = \frac{1}{NM} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \hat{\mu}_{ij}, \quad (2.29)$$

$$\hat{\alpha}_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \hat{\mu}_{ij} - \hat{\mu}, \quad (2.30)$$

$$\hat{\beta}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{\mu}_{ij} - \hat{\mu}. \quad (2.31)$$

Odhad reziduí (odchylek) je

$$\hat{e}_{ijk} = y_{ijk} - \hat{\mu} - \hat{\alpha}_i - \hat{\beta}_j. \quad (2.32)$$

Odhad interakcí

$$\hat{\tau}_{ijk} = \hat{\mu}_{ijk} - \hat{\mu} - \hat{\alpha}_i - \hat{\beta}_j. \quad (2.33)$$

Pro vyvážený model dvoufaktorové analýzy rozptylu se využívá metody nejmenších čtverců, která bývá v regresní analýze nejčastěji používána. V tabulce jsou uvedeny jednotlivé součty čtverců odchylek a složky rozptylu. [17]

Tabulka 2.2: Vyvážená dvoufaktorová analýza rozptylu.

	Součet čtverců	Stupně volnosti	Průměrný čtverec	Kritérium F
Faktor A	$S_A = nM \sum_{i=1}^N \hat{\alpha}_i^2$	$N - 1$	$M_A = \frac{S_A}{N-1}$	$F_A = \frac{M_A}{M_R}$
Faktor B	$S_B = nN \sum_{j=1}^M \hat{\beta}_j^2$	$M - 1$	$M_B = \frac{S_B}{M-1}$	$F_B = \frac{M_B}{M_R}$
Interakce AB	$S_{AB} = n \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \hat{\tau}_{ij}^2$	$(N - 1)(M - 1)$	$M_{AB} = \frac{S_{AB}}{(N-1)(M-1)}$	$F_{AB} = \frac{M_{AB}}{M_R}$
Reziduální	$S_R = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \hat{\mu}_{ij})^2$	$MN(n - 1)$	$M_R = \frac{S_R}{MN(n-1)}$	
Celkový	$S_C = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \hat{\mu})^2$	$MNn - 1$		

V tabulce nacházíme faktor A , který značí řádkové efekty, pro tento experiment je faktor A upínací délka, faktor B odpovídající sloupcovým efektům popisuje rychlost příčnicku, interakce faktorů AB vyjadřuje kombinaci obou faktorů, reziduum je odhad chyb. V druhém sloupci jsou uvedeny součty čtverců odchylek pro zmíněné faktory, interakce a reziduální rozptyl, následně je pak vypočten celkový součet. F-kritérium slouží ke zjištění nevýznamnosti, případně významnosti jednotlivých faktorů a jejich interakce. M_R značí nevychýlený reziduální rozptyl, ten bere v úvahu vnější vlivy.

3 Experimentální část

Na vybraných délkových textilních útvarech bude sledován tvar průměrné tahové pracovní křivky za odlišných podmínek měření, tedy s různou upínací délkou a lišící se rychlostí příčnicku. U zmíněných materiálů předpokládáme vliv rychlosti deformace a upínací délky. Očekáváme pokles pevnosti s rostoucí upínací délkou, zatímco s rostoucí rychlostí deformace bude pevnost růst, ale klesat tažnost.

Dále bude popsán experimentální postup, použitý přístroj, následně budou uvedeny výsledky měření společně s grafy a statistické vyhodnocení.

3.1 Vzorky

Experiment byl proveden na třech délkových textiliích, na multifilu z Twaronu 2300, multifilu z Kevlaru a příze z Kevlaru, jejich základní známé parametry jsou uvedeny v tabulce 3.1. Byl sledován vliv rychlosti deformace na mechanické vlastnosti (pevnost, tažnost, počáteční modul) zmíněných materiálů.

Tabulka 3.1: Měřené vzorky a jejich parametry.

	Twaron multifil	Kevlar multifil	Kevlar příze
Jemnost (dtex)	1680	440	200
Pevnost v tahu (N)	385	95	-
Prodloužení do přetrhu (%)	3,9	3,1	-
Zákrut (1/m)	90	120	474

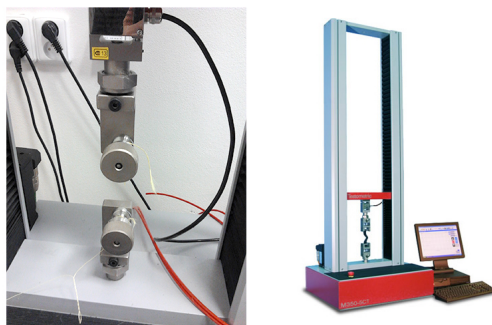
3.2 Měřící aparatura

Měření probíhalo v klimatizovaném prostředí laboratoře na trhacím přístroji Testometric M350-5 CT (obrázek 3.1), který funguje na principu konstantního přírůstku deformace. Přístroj je spojen s PC se statistickým softwarem Win Test Analysis,

který zaznamenává hodnoty pro nejvyšší pevnost [N], tažnost při nejvyšší pevnosti [%], prodloužení při nejvyšší pevnosti [mm], čas pro dosažení přetrhu [s], práci do přetrhu [N·m], vykresluje také tahové křivky jednotlivých zkoušek.

Skládá se z vyměnitelných čelistí, příčníku, 2 × sloupu, pohonu, kuličkových šroubů, které zajišťují pohyb příčníku. U tohoto experimentu musely být použity mechanické čelisti pro opásání vzorku, kde se vzorek omotal kolem čelistí a zajistil šroubem čelisti, nedocházelo tak k prokluzu vláken.

Pro správný chod programu je nutné před začátkem měření zadat hodnotu upínací délky a rychlosti příčníku. Vlastních tahových zkoušek bylo provedeno 50 ×, pro každou rychlost příčníku odpovídající určité upínací délce (tj. 1250 měření pro jeden materiál). Jednotlivé upínací délky a rychlosti příčníku jsou uvedeny v tabulce 3.2 a 3.3.



Obrázek 3.1: Trhacím přístroji Testometric M350-5 CT.

Tabulka 3.2: Vypočtená hodnota rychlosti deformace [min^{-1}] pro jednotlivé upínací délky a rychlosti příčníku pro Twaron.

rychlost příčníku [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]	upínací délka [mm]				
	50	100	200	250	500
50	1	0,5	0,25	0,2	0,1
100	2	1	0,5	0,4	0,2
200	4	2	1	0,8	0,4
250	5	2,5	1,25	1	0,5
500	10	5	2,5	2	1

Podílem rychlosti příčníku [mm/min] a upínací délky [mm] je tzv. rychlost deformace [$1/\text{min}$] (tabulka 3.2 a 3.3).

Vzhledem k tomu, že výsledné velikosti měřených veličin si byly v hodnotách upínací délky 200 mm a 250 mm velmi podobné, došlo ke změně upínací délky

Tabulka 3.3: Vypočtená hodnota rychlosti deformace [min^{-1}] pro jednotlivé upínací délky a rychlosti příčnicku pro Kevlar multifil a přízi.

rychlost příčnicku [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]	upínací délka [mm]				
	50	100	200	350	500
50	1	0,5	0,25	0,1429	0,1
100	2	1	0,5	0,2857	0,2
200	4	2	1	0,5714	0,4
250	5	2,5	1,25	0,7143	0,5
500	10	5	2,5	1,4286	1

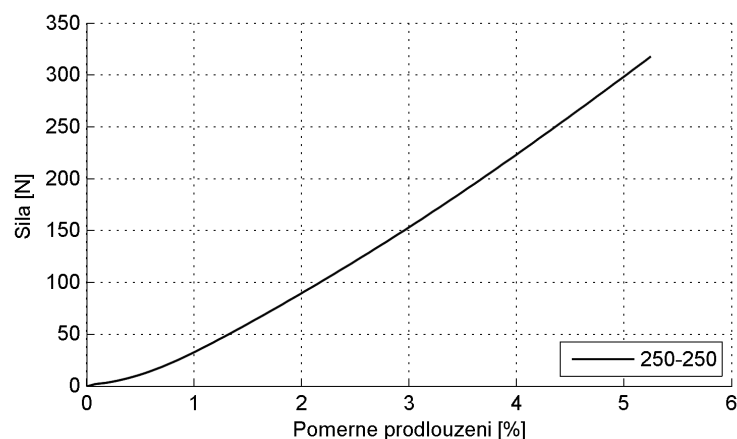
z 250 mm na 350 mm. Původní upínací délky byly použity pouze pro materiál Twaron, v dalších měřeních se uplatnila změněná upínací délka, tomu odpovídá tabulka 3.3.

3.3 Výsledky měření a diskuse

3.3.1 Průměrné tahové křivky

Výsledkem měření na trhacím přístroji byly jednotlivé tahové křivky daného materiálu, ze kterých byly za pomoci programu MATLAB vytvořeny průměrné pracovní křivky pro každou upínací délku a rychlost příčnicku.

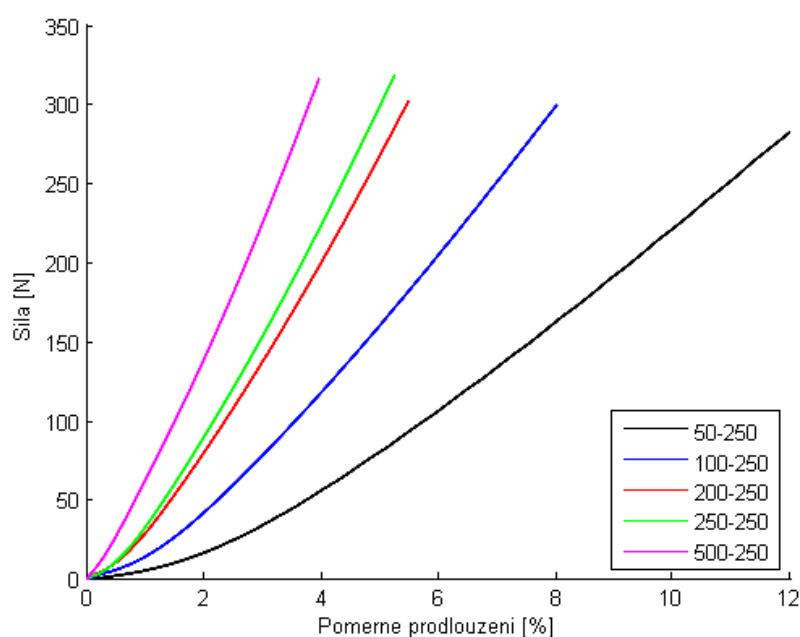
Průměrné tahové křivky byly použity pro zjištění vlivu upínací délky při shodné rychlosti příčnicku.



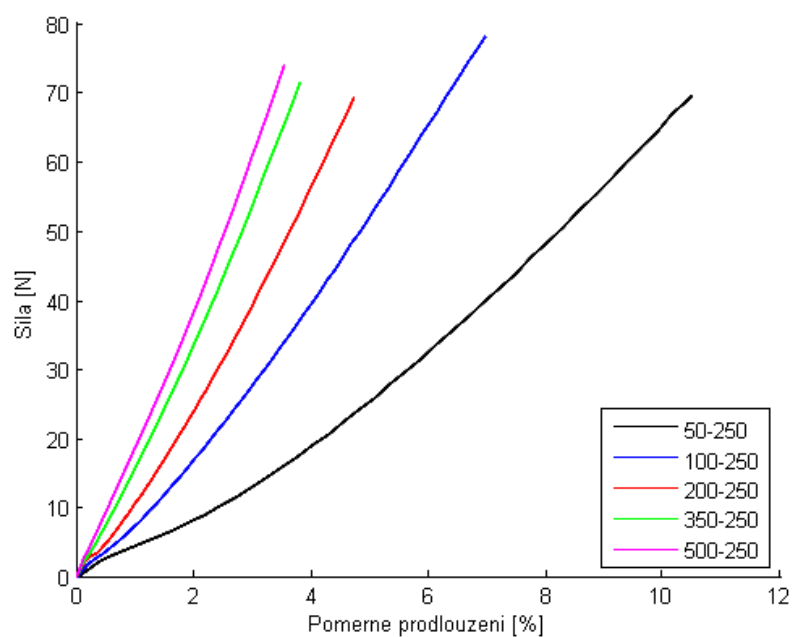
Obrázek 3.2: Průměrná tahová křivka Twaron multifil pro upínací délku 250 mm při rychlosti pohybu příčnicku $250 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Z grafů pro rychlost pohybu příčnicku je patrný vliv upínacích délek na počáteční modul pružnosti, který udává strmost křivky, se zvyšováním upínací délky se zvyšuje počáteční modul. Se zvyšující upínací délkou dochází k postupnému snižování poměrného prodloužení. Pro vybranou rychlost příčnicku $250 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ jsou uvedeny grafy na obrázcích 3.3, 3.4 a 3.5. Všechny grafy naleznete v příloze A.

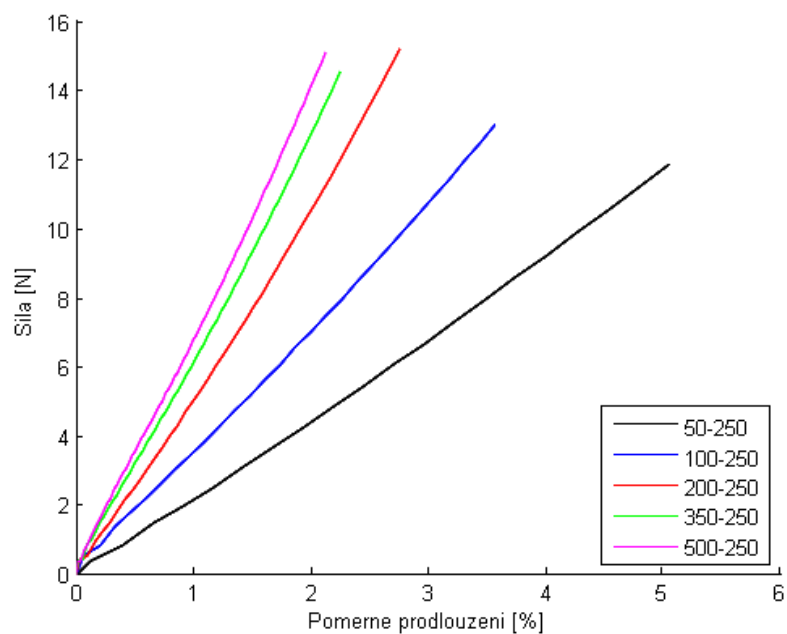
Z průměrných tahových křivek byly za pomoci programu MATLAB odečítány hodnoty modulu pružnosti, které jsou zaznamenány v následujících tabulkách 3.4, 3.5 a 3.6.



Obrázek 3.3: Průměrné tahové křivky pro různé upínací délky při rychlosti pohybu příčnicku $250 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro multifil z Twaronu



Obrázek 3.4: Průměrné tahové křivky pro různé upínací délky při rychlosti pohybu příčnicku $250 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro multifil z Kevlaru



Obrázek 3.5: Průměrné tahové křivky pro různé upínací délky při rychlosti pohybu příčnicku $250 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro přízi z Kevlaru

3.4 Multifil z Twaronu

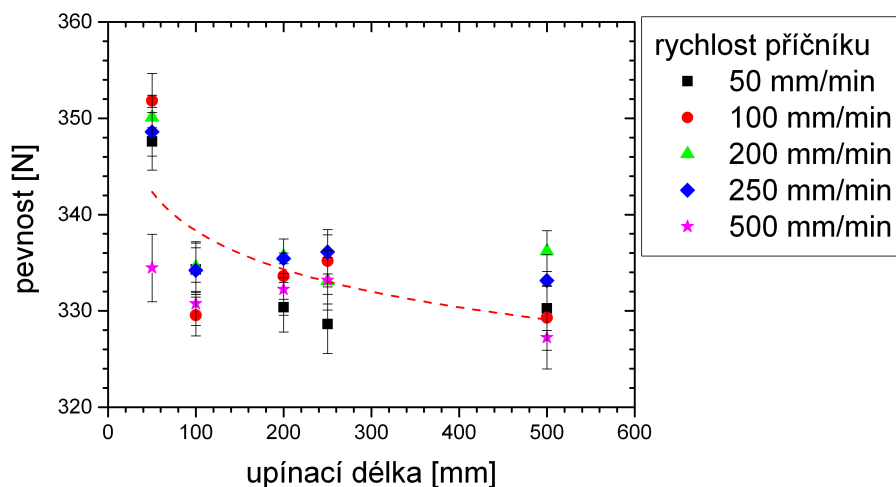
V tabulce 3.4 jsou uvedeny určené průměrné hodnoty mechanicko-fyzikální vlastností. Základní statistické charakteristiky pro jednotlivé veličiny jsou uvedeny v příloze B.

Tabulka 3.4: Průměrné hodnoty mechanických vlastností pro multifil z Twaronu.

upínací délka [mm]	rychlost příčnicku [mm/min]	rychlost deformace [1/min]	pevnost [N]	tažnost [%]	práce do přetrhu [N.m]	modul pružnosti [N/mm]
50	50	1	347,6	14,14	1,07	7,69
50	100	2	351,8	14,14	1,06	6,13
50	200	4	350,1	13,92	1,03	5,35
50	250	5	348,6	14,06	1,04	5,14
50	500	10	334,5	13,86	0,96	4,28
100	50	0,5	334,3	8,96	1,31	13,81
100	100	1	329,6	8,96	1,27	13,25
100	200	2	334,5	9,00	1,29	12,10
100	250	2,5	334,2	8,72	1,26	12,95
100	500	5	330,7	8,71	1,23	9,38
200	50	0,25	330,4	5,79	1,72	27,32
200	100	0,5	333,6	5,77	1,72	27,72
200	200	1	335,7	5,92	1,74	21,75
200	250	1,25	335,5	5,96	1,74	20,23
200	500	2,5	332,2	5,96	1,71	15,75
250	50	0,2	328,6	5,37	1,96	27,94
250	100	0,4	335,2	5,44	2,00	19,47
250	200	0,8	333,1	5,41	1,97	20,92
250	250	1	336,1	5,48	2,00	18,81
250	500	2	333,2	5,44	1,97	15,44
500	50	0,1	330,3	4,23	3,12	36,71
500	100	0,2	329,3	4,11	3,10	48,52
500	200	0,4	336,2	4,14	3,18	47,21
500	250	0,5	333,2	4,14	3,14	45,27
500	500	1	327,2	4,08	3,03	40,47

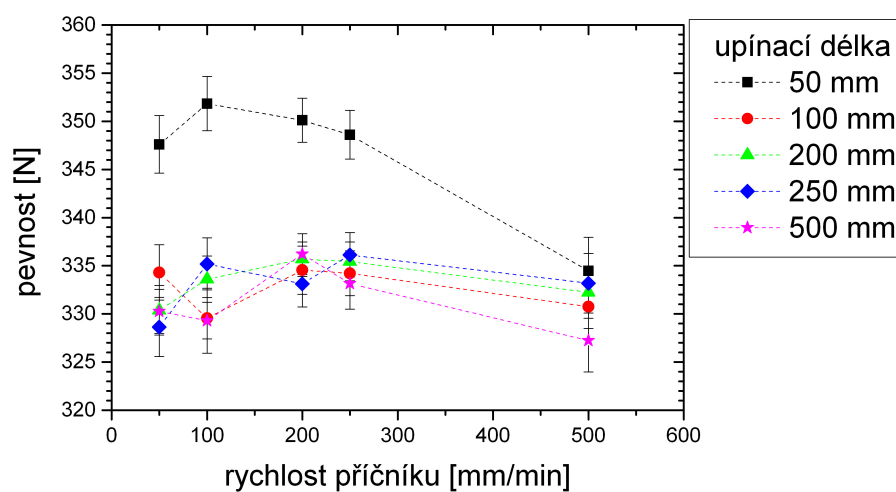
Z tabulky 3.4 byly vytvořeny grafy pro závislosti mechanických vlastností na upínací délce, rychlosti příčnicku a rychlosti deformace. V následujících grafech jsou barevně vyznačeny jednotlivé rychlosti příčnicku, nebo upínací délky, a interval spolehlivosti (=konfidenční interval – interval, ve kterém s pravděpodobností 95% leží skutečná hodnota odhadované veličiny). Grafy byly proloženy křivkou pro lepší představu trendu a vedení oka.

3.4.1 Pevnost



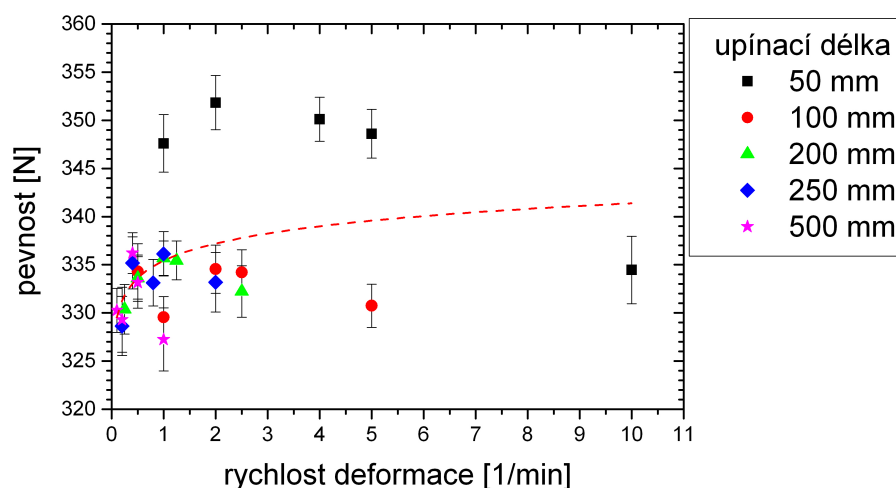
Obrázek 3.6: Závislost pevnosti na upínací délce.

Graf závislosti pevnosti na upínací délce zobrazený na obrázku 3.6 vykazuje klesající trend.



Obrázek 3.7: Vliv rychlosti přičníku na pevnost při různých upínacích délkách.

V grafu na obrázku 3.7 jsou vyneseny hodnoty pevnosti v závislosti na rychlosti přičníku. Křivky mají podobný průběh až na křivku s upínací délkou 50 mm, která vykazuje o něco vyšší hodnoty pevnosti než ostatní hodnoty.



Obrázek 3.8: Závislost pevnosti na rychlosti deformace.

Mírně rostoucí trend pevnosti na rychlosti deformace můžeme pozorovat na obrázku 3.8 (pevnost se zvyšující se rychlostí deformace roste).

3.4.1.1 Analýza vlivu faktorů na pevnost pomocí ANOVA

Z průměrných hodnot obsažených v tabulce 3.4 byly podle tabulky 2.2 vytvořeny následující grafy. Vliv faktorů na pevnost materiálu je zobrazen na obrázcích 3.6 - 3.8.

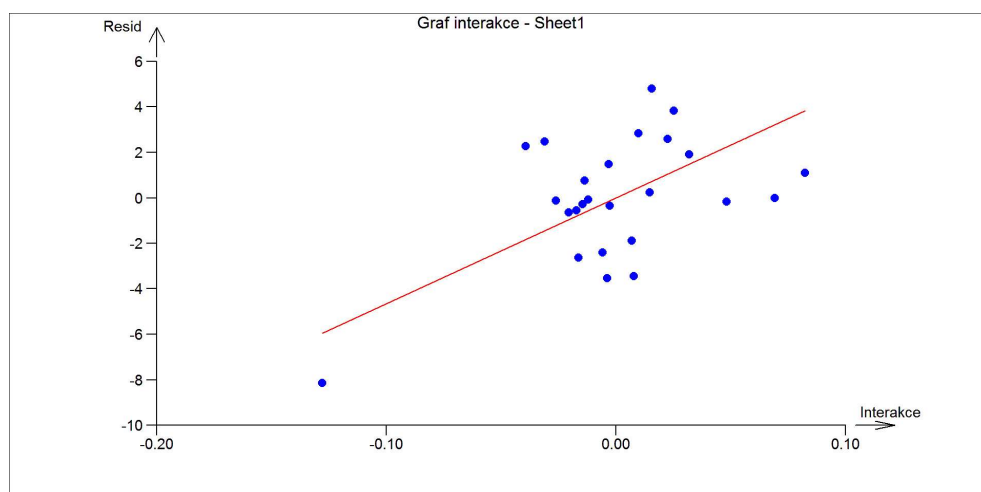
Tabulka 3.5: Vliv upínací délky a rychlosti příčnicku na pevnost pro multifil z Twaronu.

Zdroj variability	Součet čtverců	Průměrný čtverec	Stupně volnosti	Směr. odch.	F-kritérium	Kritický kvantil	Závěr
upínací délka [mm]	783,909	195,977	4	13,999	17,359	3,007	Významný
rych. příc. [mm/min]	135,908	33,977	4	5,829	3,01	3,007	Významný
Interakce	46,924	46,924	1	13,44	5,264	4,543	Významný
Rezidua	133,71	8,914	15	2,986			
Celkem	1100,452	45,852	24	6,771			

Z tabulky 3.5 lze podle velikosti F- kritéria usoudit, že největší vliv na pevnost twaronového multifilu má upínací délka, rychlost příčnicku ovlivňuje pevnost minimálně, přesto je zhodnocena jako významný faktor, větší význam než rychlost příčnicku vykazuje interakce obou faktorů, jejíž hodnota F-kritéria je vyšší než rychlosti příčnicku, ale nižší než hodnota upínací délky.

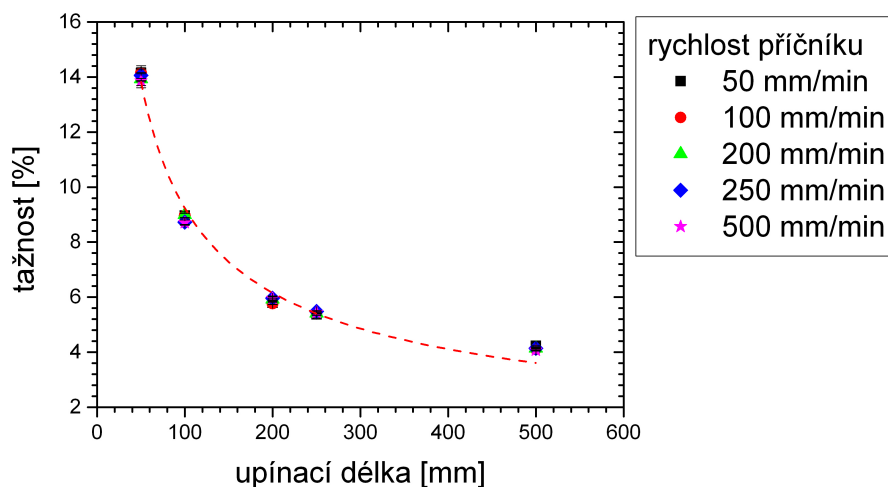
Na obrázku 3.9 je zobrazen vliv interakce obou faktorů, body mají rostoucí trend a dle manuálu pro QC expert proložení červenou přímkou znamená významný vliv

na pevnost materiálu. To potvrzuje i výsledek uvedený v tabulce 3.5 pro interakci obou faktorů.



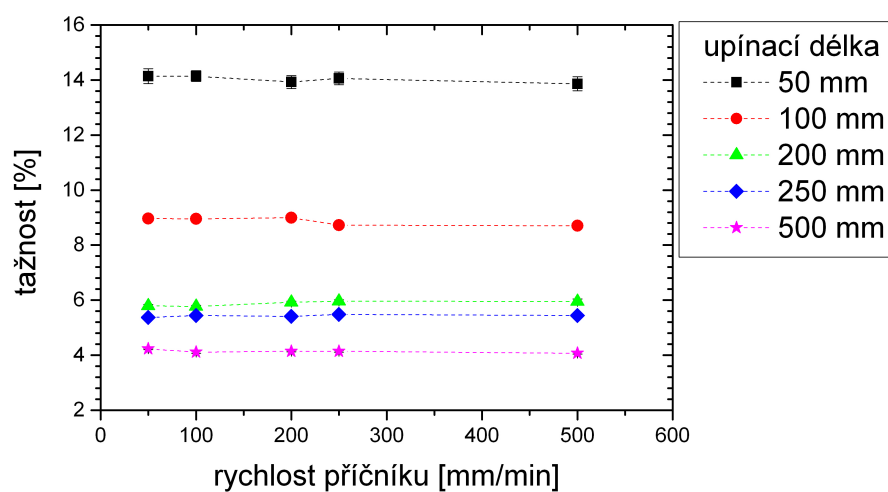
Obrázek 3.9: Vliv interakce obou faktorů na pevnost.

3.4.2 Tažnost



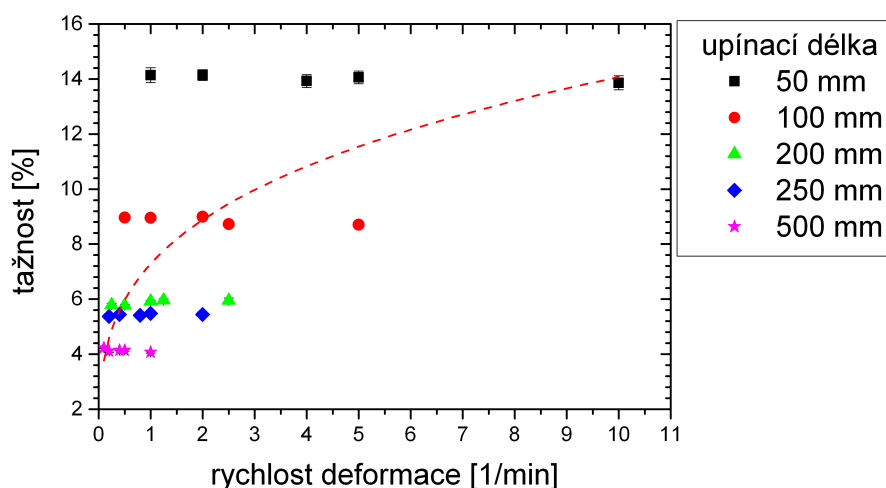
Obrázek 3.10: Závislost tažnosti na upínací délce.

V grafu závislosti tažnosti na upínací délce 3.10 pro multifil z Twaronu můžeme pozorovat klesající trend s rostoucí upínací délkou.



Obrázek 3.11: Vliv rychlosti příčnicku na tažnost.

Obrázek 3.11 potvrzuje nevýznamnost vlivu rychlosti příčnicku na tažnost, křivky jsou v podstatě přímky rovnoběžné s osou x, pro všechny rychlosti příčnicku dosahuje multifil téměř shodných hodnot tažnosti pro danou upínací délku. Naopak je i zde vidět výrazný vliv upínací délky.



Obrázek 3.12: Závislost tažnosti na rychlosti deformace.

Celková tažnost v závislosti na rychlosti deformace v grafu 3.12 vykazuje rostoucí tendenci.

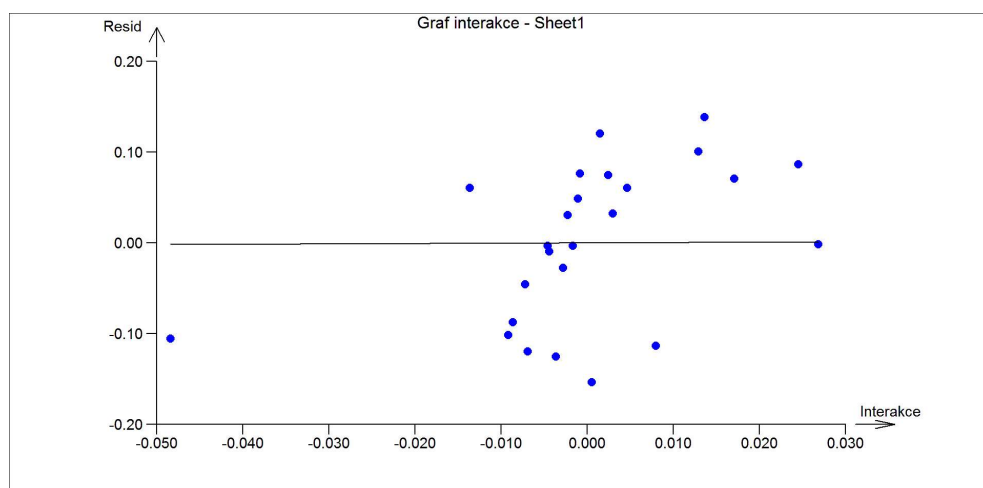
3.4.2.1 Analýza vlivu faktorů na tažnost pomocí ANOVA

Tabulka 3.6: Vliv upínací délky a rychlosti příčnicku na tažnost pro Twaron multifil.

Zdroj variability	Součet čtverců	Průměrný čtverec	Stupně volnosti	Směr. odch.	F-kritérium	Kritický kvantil	Závěr
upínací délka [mm]	312,609	78,152	4	8,84	7130,169	3,007	Významný
rych. příč. [mm/min]	0,024	0,006	4	0,078	0,548	3,007	Nevýznamný
Interakce	0,038	0,038	1	0,419	4,11	4,543	Nevýznamný
Rezidua	0,138	0,009	15	0,096			
Celkem	312,808	13,034	24	3,61			

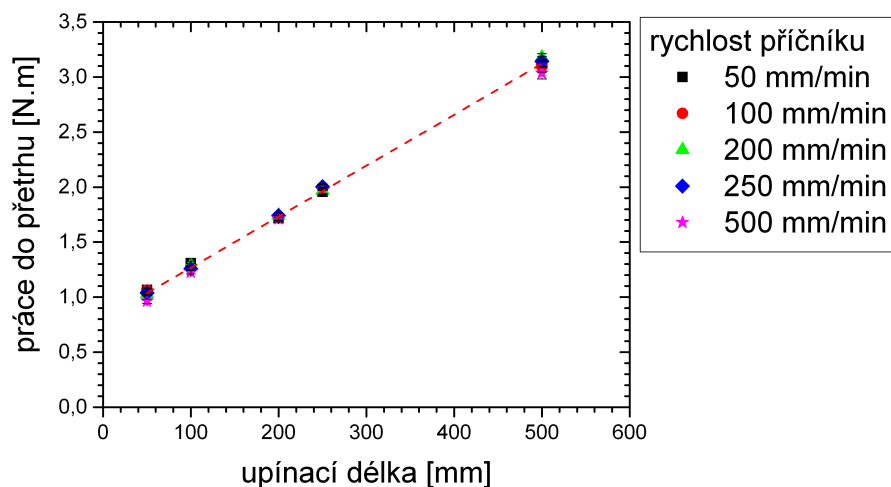
Podle tabulky 3.6 hodnota F-kritéria upínací délky značí velký vliv upínací délky na tažnost Twaronu. Rychlost příčnicku a interakce obou faktorů jsou dle F-testu nevýznamnými vlivy, jejich hodnoty F-kritéria jsou nižší než velikosti kritického kvantilu, což zapříčiňuje jejich označení za nevýznamné.

Body grafu interakce 3.13 nemají rostoucí tendenci, jsou nerovnoměrně rozptýleny, vliv interakce není významný.



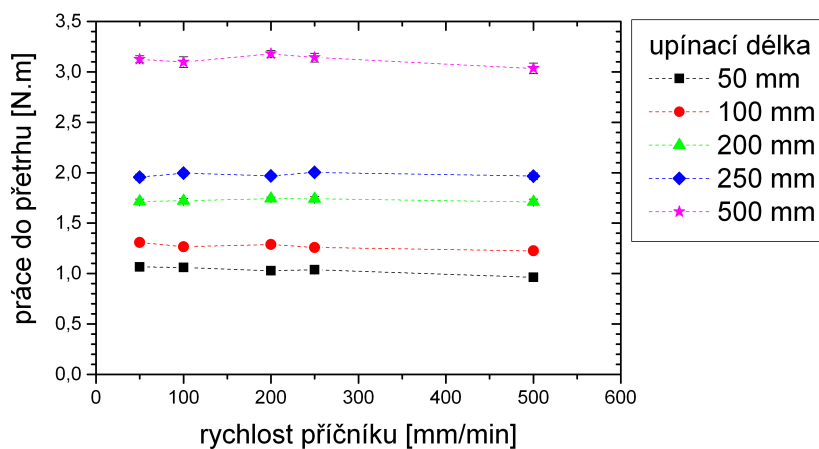
Obrázek 3.13: Vliv interakce obou faktorů na tažnost

3.4.3 Práce do přetrhu



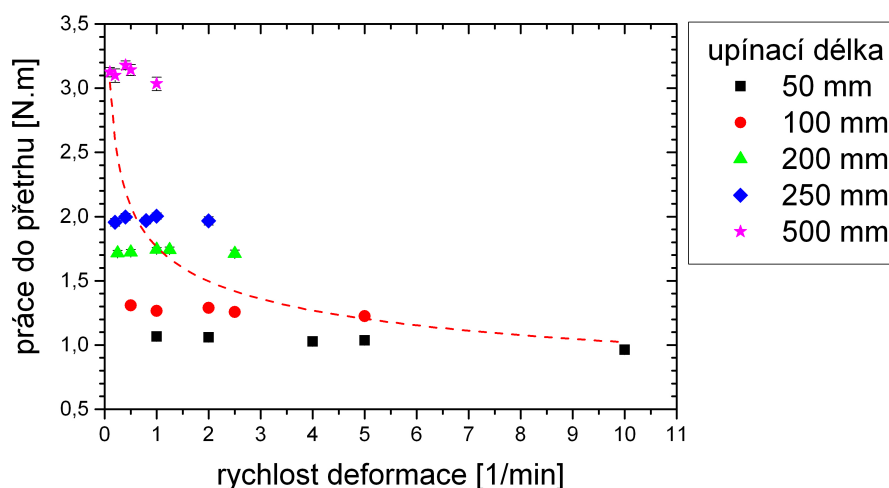
Obrázek 3.14: Závislost práce do přetrhu na upínací délce.

Z obrázku 3.14 lze vyčíst lineární závislost práce do přetrhu na upínací délce. Práce do přetrhu roste se zvyšující se upínací délkou.



Obrázek 3.15: Vliv rychlosti příčnicku na práci do přetrhu.

Vliv rychlosti příčnicku je zde významný dle testu ANOVA níže. Pro danou upínací délku jsou hodnoty práce do přetrhu ale téměř totožné, tedy s rychlostí příčnicku se hodnoty práce do přetrhu nemění, jsou takřka rovnoběžné s osou x. Přestože shodné průběhy křivek na obr. 3.15 značí významnost vlivu, hodnota F-kritéria je na hranici významnosti, tudíž vliv rychlosti příčnicku je sporný.



Obrázek 3.16: Závislost práce do přetrhu na rychlosti deformace.

V grafu 3.16 je znatelný klesající trend, práce do přetrhu klesá s rostoucí rychlostí deformace.

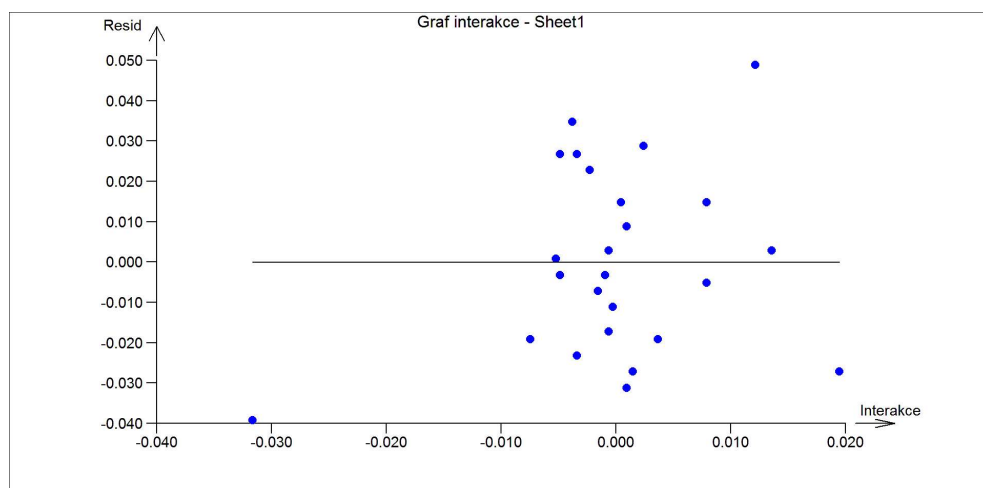
3.4.3.1 Analýza vlivu faktorů na práci do přetrhu pomocí ANOVA

Tabulka 3.7: Vliv upínací délky a rychlosti příčnicku na práci do přetrhu pro multifil z Twaronu.

Zdroj variability	Součet čtverců	Průměrný čtverec	Stupně volnosti	Směr. odch.	F-kritérium	Kritický kvantil	Závěr
upínací délka [mm]	13,189	3,297	4	1,816	4252,887	3,007	Významný
rych. příf. [mm/min]	0,013	0,003	4	0,056	4,044	3,007	Významný
Interakce	0,001	0,001	1	0,111	1,034	4,543	Nevýznamný
Rezidua	0,012	0,001	15	0,028			
Celkem	13,214	0,551	24	0,742			

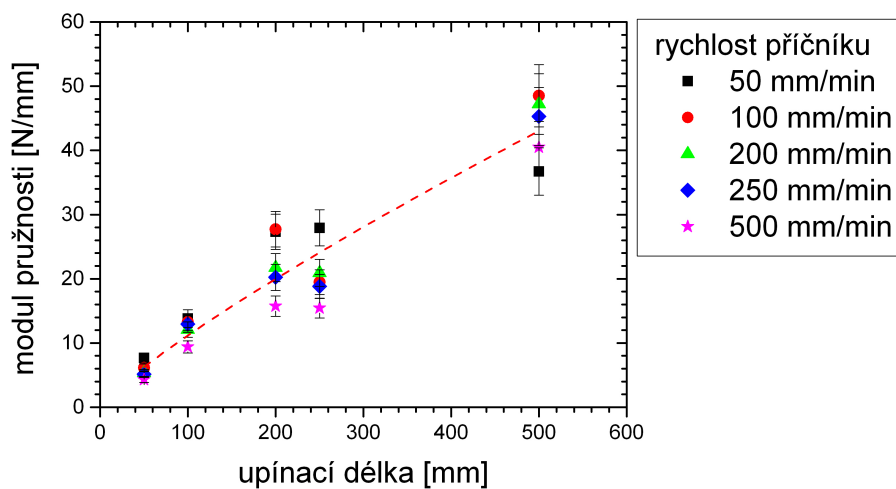
Vysoká hodnota F-kritéria upínací délky udává významný vliv upínací délky na práci do přetrhu. Rychlost příčnicku nemá hodnotu F-kritéria tak vysokou, ale je vyšší než kritický kvantil, tudíž je brán jako významný vliv. F-kritérium interakce faktorů dosahuje velmi nízké hodnoty, není tak významným vlivem na práci do přetrhu.

Významný vliv interakce faktorů se v grafu 3.17 nepotvrdil, body nenaznačují rostoucí trend.



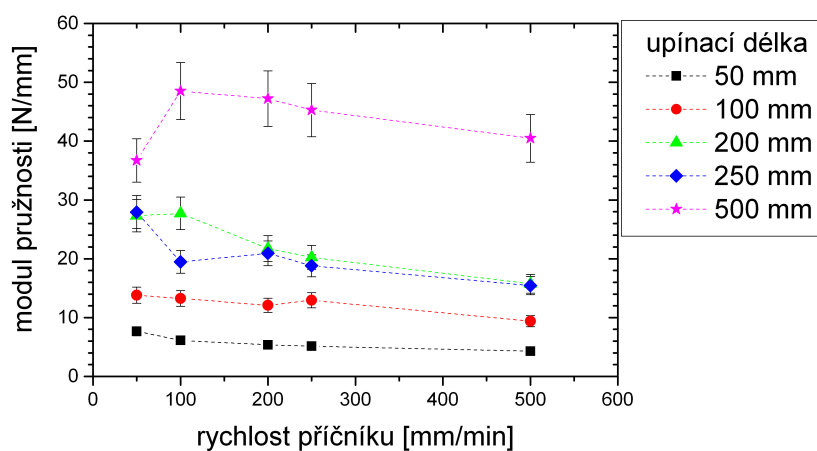
Obrázek 3.17: Vliv interakce obou faktorů na práci do přetrhu.

3.4.4 Modul pružnosti



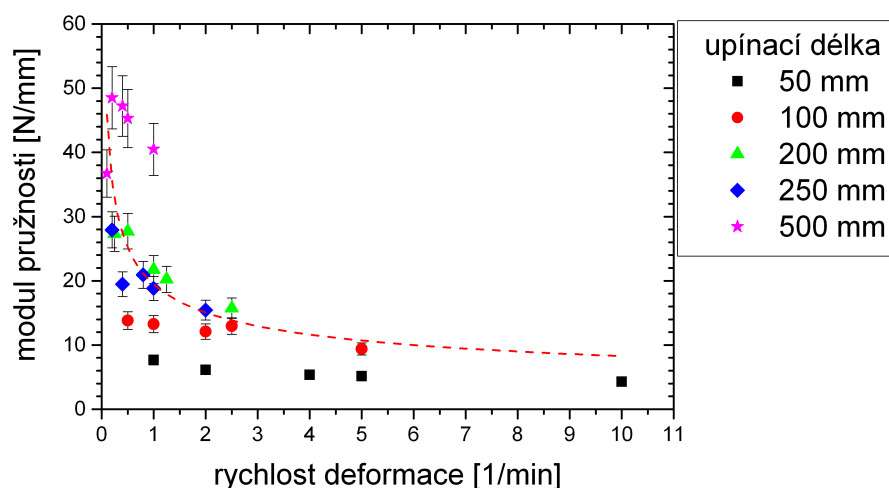
Obrázek 3.18: Závislost počátečního modulu na upínací délce.

Modul pružnosti v závislosti na upínací délce na obrázku 3.18 roste, pouze některé hodnoty upínací délky 250 mm tento trend nepatrně narušují.



Obrázek 3.19: Vliv rychlosti příčnicku na počáteční modul.

Více rozptýlené průběhy křivek na obrázku 3.19 naznačují nevýznamnost vlivu rychlosti příčnicku na počáteční modul.



Obrázek 3.20: Závislost počátečního modulu na rychlosti deformace.

U grafu závislosti modulu pružnosti na rychlosti deformace 3.20 je viditelná klesající tendence modulu pružnosti se zvyšující se rychlostí deformace.

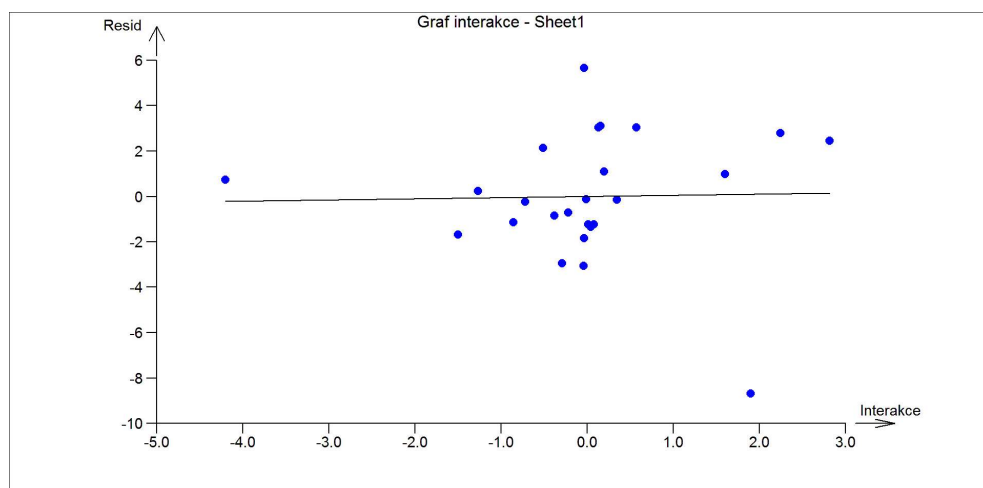
3.4.4.1 Analýza vlivu faktorů na modul pružnosti pomocí ANOVA

Tabulka 3.8: Vliv upínací délky a rychlosti příčnicku na počáteční modul pro Twaron multifil.

Zdroj variability	Součet čtverců	Průměrný čtverec	Stupně volnosti	Směr. odch.	F-kritérium	Kritický kvantil	Závěr
upínací délka [mm]	4120,921	1030,23	4	32,097	87,504	3,007	Významný
rych. příc. [mm/min]	114,578	28,644	4	5,352	2,433	3,007	Nevýznamný
Interakce	0,061	0,061	1	13,725	0,005	4,543	Nevýznamný
Rezidua	188,315	12,554	15	3,543			
Celkem	4423,875	184,328	24	13,577			

Významný vliv na počáteční modul má podle F-testu upínací délka, zatímco rychlost příčnicku a interakce faktorů nemají díky svým nízkým hodnotám F-kritéria významný vliv.

Vliv interakce je nevýznamný, body v grafu 3.21 nevykazují rostoucí trend.



Obrázek 3.21: Vliv interakce obou faktorů na počáteční modul.

3.4.5 Shrnutí pro multifil z Twaronu

Pro multifil z Twaronu byly zjištěny významné vlivy faktorů (upínací délka, rychlost příčnicku, interakce obou faktorů) na jeho mechanické vlastnosti. Největší význam pro tento multifil má upínací délka, která ovlivňuje pevnost, tažnost, práci do přetrhu i počáteční modul.

Pevnost s rostoucí upínací délkou klesá, což odpovídá teorii nejslabšího článku, která je popsána v sekci 2.5.4.1.

Rychlost příčnicku má významný vliv pouze pro pevnost a práci do přetrhu, přičemž hodnoty F-kritérií pro rychlost pohybu příčnicku jsou jen o málo větší než hodnoty odpovídajícího kritického kvantilu (vliv je na pomezí významnosti).

Interakce obou faktorů (rychlost deformace) je významným faktorem pouze pro pevnost multifilu z Twaronu. Pevnost s rostoucí rychlostí deformace roste, což se shoduje s teoretickými poznatky v 2.5.4.2. S růstem rychlosti deformace by dle této teorie mělo docházet k poklesu tažnosti, k tomu v našem případě nedochází. Důvody mohou být různé, vliv rychlosti deformace se nemusel projevit díky nízkým hodnotám rychlosti pohybu příčnicku oproti upínací délce a houževnatost materiálu. V teorii uvedené v rešeršní části byly naměřené hodnoty pro daleko vyšší rychlosti příčnicku a kratší upínací délky a tudíž vyšší rychlosti deformace.

Práce do přetrhu nevykazuje silnou závislost na rychlosti příčnicku, naproti tomu roste s upínací délkou (dosahuje nejvyšších hodnot pro největší upínací délku), proto závislost na rychlosti deformace vykazuje klesající trend.

Obdobné chování pozorujeme i pro modul pružnosti. Modul pružnosti se s upínací délkou zvyšuje, což je patrné z tahových křivek v příloze A, pro které se zvyšuje strmost s upínací délkou.

3.5 Multifil z Kevlaru

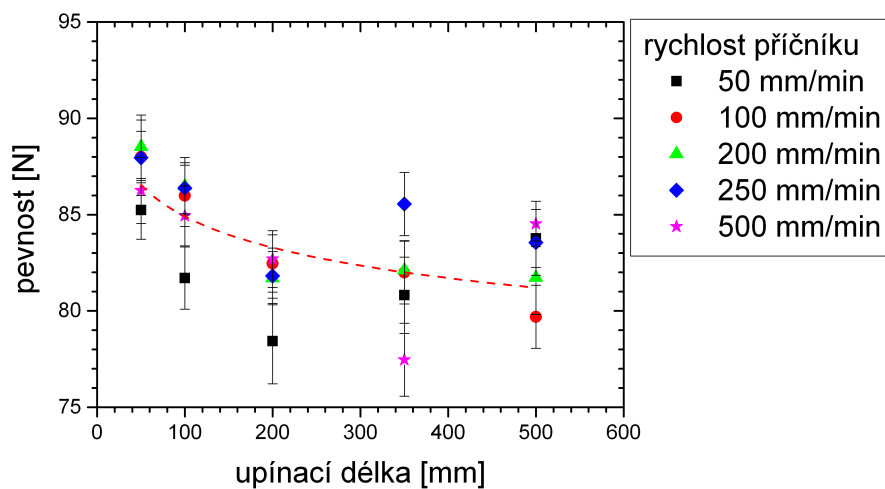
V tabulce níže jsou uvedeny určené průměrné hodnoty mechanicko-fyzikální vlastností. Základní statistická analýza pro jednotlivé veličiny je uvedena v příloze B.

Tabulka 3.9: Průměrné hodnoty mechanických vlastností pro multifil z Kevlaru.

upínací délka [mm]	rychlost příčnicku [mm/min]	rychlost deformace [1/min]	pevnost [N]	tažnost [%]	práce do přetrhu [N.m]	modul pružnosti [N/mm]
50	50	1	85,2	12,57	0,237	4,59
50	100	2	88,0	12,35	0,248	4,76
50	200	4	88,5	12,45	0,251	4,58
50	250	5	88,0	12,69	0,250	4,14
50	500	10	86,3	12,36	0,242	4,09
100	50	0,5	81,7	6,99	0,281	10,12
100	100	1	86,0	7,56	0,307	8,26
100	200	2	86,5	7,67	0,311	7,69
100	250	2,5	86,4	7,65	0,307	7,54
100	500	5	84,9	7,64	0,298	6,54
200	50	0,25	78,4	4,99	0,379	13,55
200	100	0,5	82,5	5,49	0,422	10,77
200	200	1	81,7	5,46	0,416	10,19
200	250	1,25	81,8	5,50	0,418	9,63
200	500	2,5	82,7	5,43	0,421	10,26
350	50	0,1	80,8	4,12	0,572	18,04
350	100	0,3	82,0	4,32	0,601	16,78
350	200	0,6	82,1	4,42	0,601	15,37
350	250	0,7	85,6	4,49	0,637	15,27
350	500	1,4	77,5	4,19	0,546	14,50
500	50	0,1	83,8	4,14	0,812	17,13
500	100	0,2	79,7	3,94	0,747	16,91
500	200	0,4	81,7	3,93	0,767	18,11
500	250	0,5	83,6	3,99	0,801	18,75
500	500	1	84,5	4,02	0,811	19,07

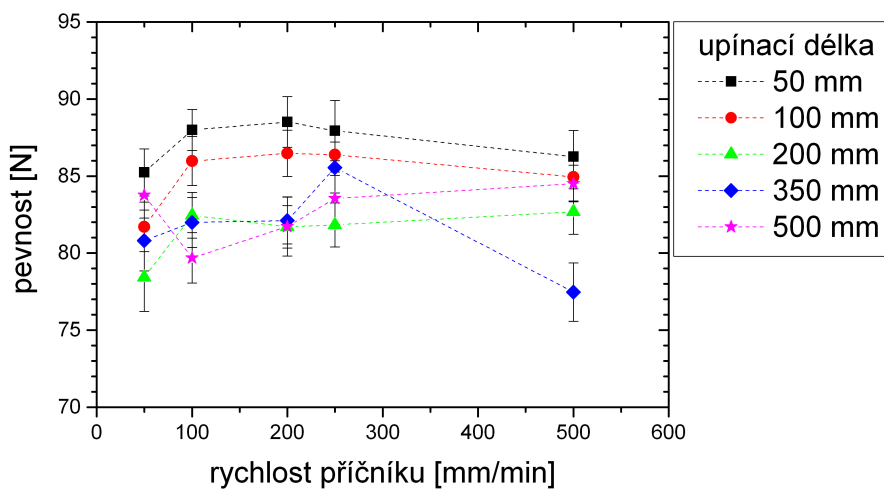
Z tabulky byly vytvořeny grafy pro závislosti mechanických vlastností na upínací délce, rychlosti příčnicku a rychlosti deformace. V následujících grafech jsou barevně vyznačeny jednotlivé rychlosti příčnicku, nebo upínací délky, a interval spolehlivosti (=konfidenční interval – interval, ve kterém s pravděpodobností 95% leží skutečná hodnota odhadované veličiny). Grafy byly proloženy křivkou pro lepší představu trendu a vedení oka.

3.5.1 Pevnost



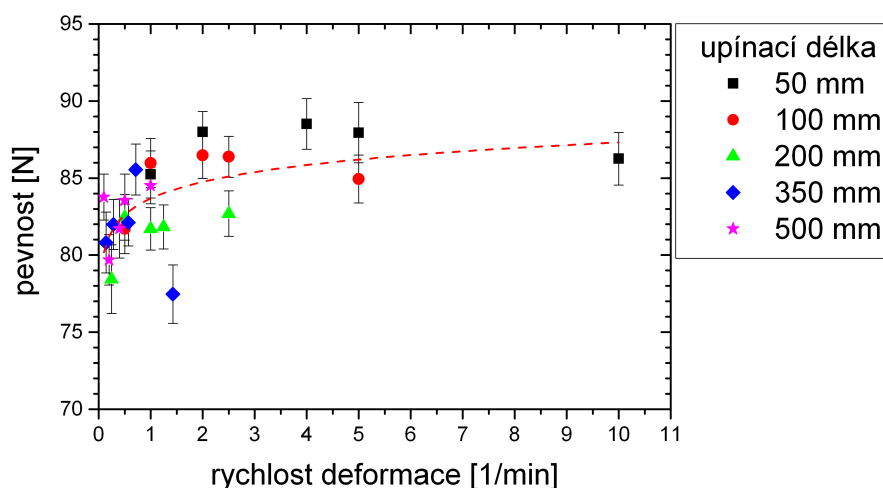
Obrázek 3.22: Závislost pevnosti na upínací délce.

Graf 3.22 značí jistý vliv upínací délky na pevnost multifilu z kevlaru. Celkově lze říci, že se zvyšující se upínací délkou klesá pevnost materiálu.



Obrázek 3.23: Vliv rychlosti přičníku na pevnost.

Z grafu 3.23 je pozorován nevýznamný vliv rychlosti přičníku na pevnost materiálu, křivky nemají stejný průběh.



Obrázek 3.24: Závislost pevnosti na rychlosti deformace.

Pevnost se zvyšuje s nárůstem rychlosti deformace na obrázku 3.24, pozorován rostoucí trend.

3.5.1.1 Analýza vlivu faktorů na pevnost pomocí ANOVA

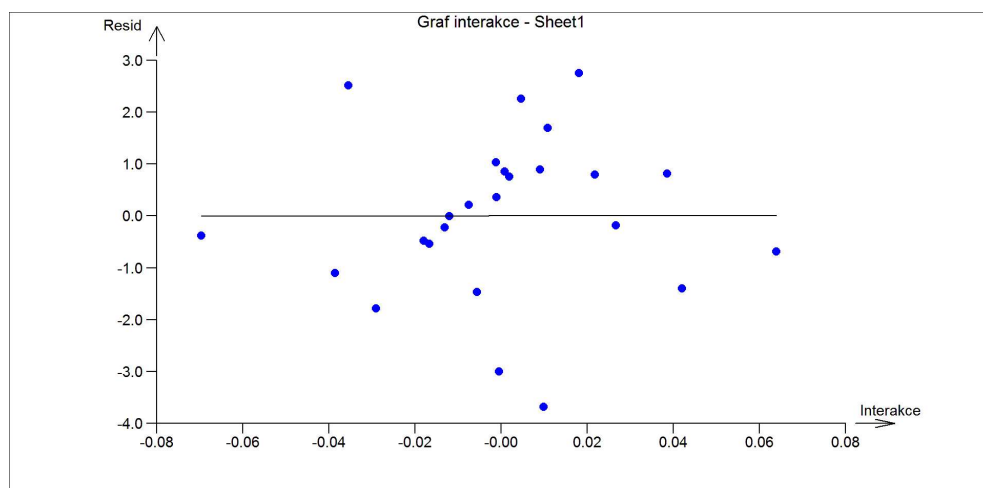
Pro určení vlivů faktorů (upínací délka, rychlost příčnicku, interakce obou faktorů) byly vytvořeny tabulky na základě tabulky 2.2 s průměrnými hodnotami z tabulky výše a také grafy znázorňující vlivy konkrétního faktoru, případně jejich interakce.

Tabulka 3.10: Vliv upínací délky a rychlosti příčnicku na pevnost pro multifil z Kevlaru.

Zdroj variability	Součet čtverců	Průměrný čtverec	Stupně volnosti	Směr. odch.	F-kritérium	Kritický kvantil	Závěr
upínací délka [mm]	124,032	31,008	4	5,568	8,468	3,007	Významný
rych. příč. [mm/min]	25,669	6,417	4	2,533	1,753	3,007	Nevýznamný
Interakce	0,136	0,136	1	7,654	0,035	4,543	Nevýznamný
Rezidua	58,45	3,897	15	1,974			
Celkem	208,287	8,679	24	2,946			

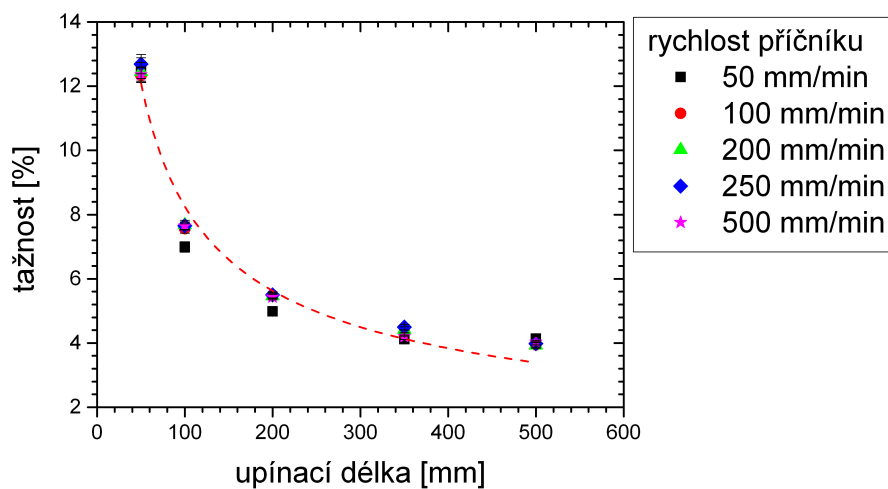
Tabulka 3.10 obsahuje důležité hodnoty F-kritérií jednotlivých faktorů a jejich interakce, můžeme z ní vyčíst, že upínací délka má významný vliv na pevnost multifilu z kevlaru, její hodnota F-kritéria je větší než kritický kvantil, což značí její významnost. Další faktor (rychlost příčnicku) a interakce upínací délky s rychlostí příčnicku jsou nevýznamné, jejich F-kritéria jsou nižší než kritický kvantil.

Významnost vlivu interakce se v grafu 3.25 nepotvrdila, body jsou nerovnoměrně rozptýleny.



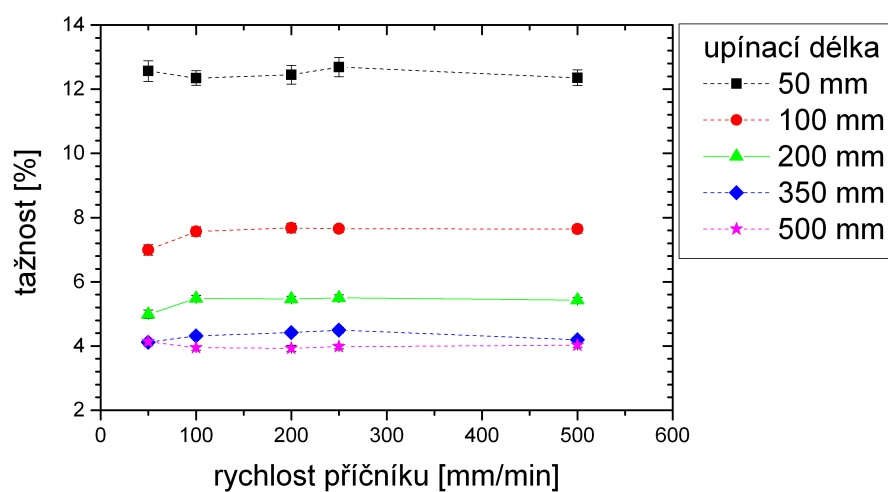
Obrázek 3.25: Vliv interakce obou faktorů na pevnost.

3.5.2 Tažnost



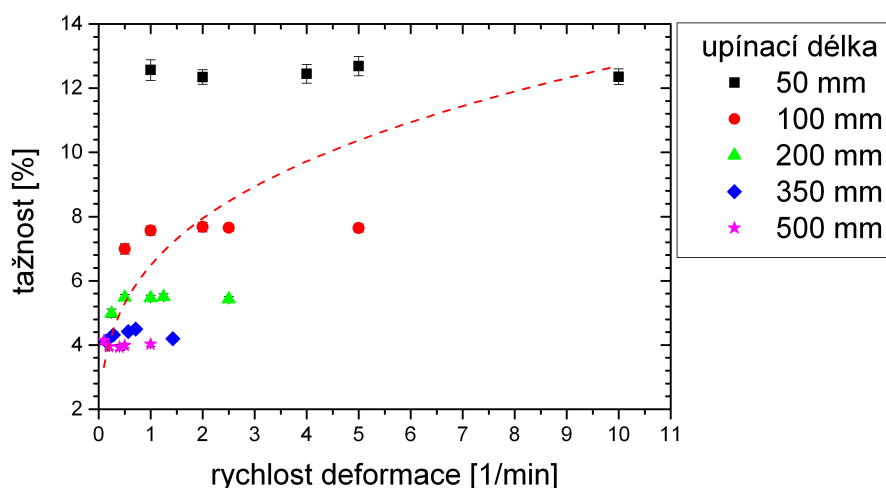
Obrázek 3.26: Závislost tažnosti na upínací délce.

V grafu 3.26 je znázorněna závislost tažnosti na upínací délce, tažnost se snižuje s rostoucí upínací délkou.



Obrázek 3.27: Vliv rychlosti přičníku na tažnost.

V grafu pro závislost tažnosti na rychlosti přičníku není pozorován významný vliv rychlosti přičníku (obrázek), křivky nemají stejné průběhy.



Obrázek 3.28: Závislost tažnosti na rychlosti deformace.

Graf tažnosti v závislosti na rychlosti deformace 3.28 ukazuje celkový rostoucí trend. Ovšem pro jednotlivé upínací délky není závislost viditelná.

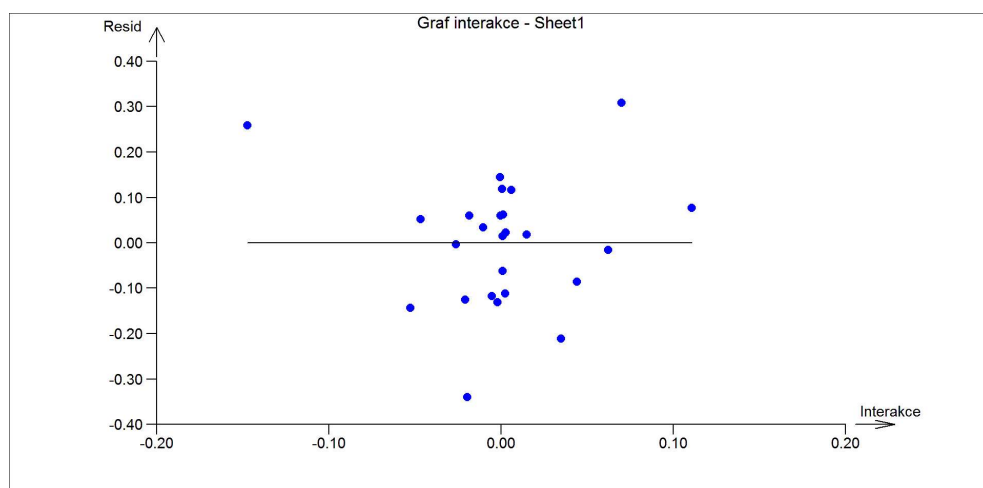
3.5.2.1 Analýza vlivu faktorů na tažnost pomocí ANOVA

Tabulka 3.11: Vliv upínací délky a rychlosti příčnicku na tažnost pro Kevlar multifil.

Zdroj variability	Součet čtverců	Průměrný čtverec	Stupně volnosti	Směr. odch.	F-kritérium	Kritický kvantil	Závěr
upínací délka [mm]	244,06	61,015	4	7,811	2022,599	3,007	Významný
rych. příc. [mm/min]	0,25	0,063	4	0,25	2,076	3,007	Nevýznamný
Interakce	0,001	0,001	1	0,695	0,021	4,543	Nevýznamný
Rezidua	0,482	0,032	15	0,179			
Celkem	244,793	10,2	24	3,194			

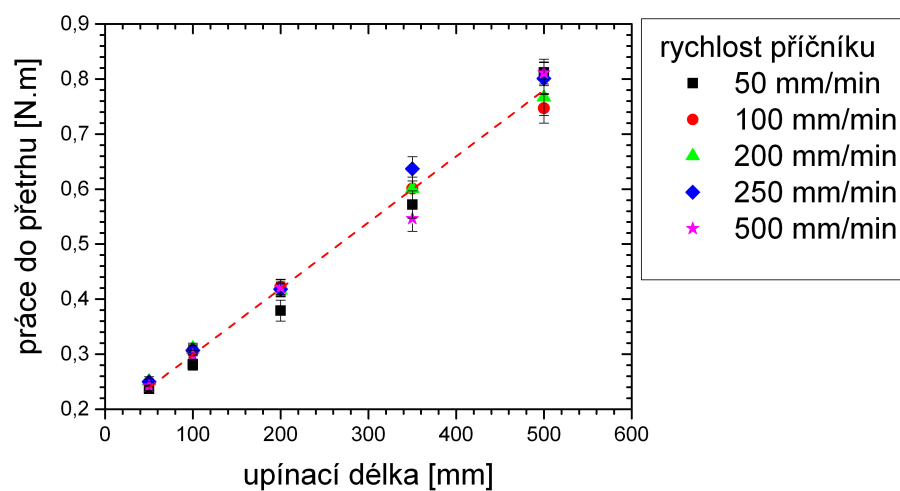
Dle tabulky 3.11 tažnost velmi významně ovlivňuje faktor upínací délky, F-kritérium upínací délky dosahuje vysoké hodnoty. Zatímco rychlost příčnicku a interakce faktorů nemají významný vliv na tažnost materiálu, jejich hodnoty F-kritérií jsou nízké.

Graf 3.29 nevykazuje významný vliv interakce na tažnost materiálu.



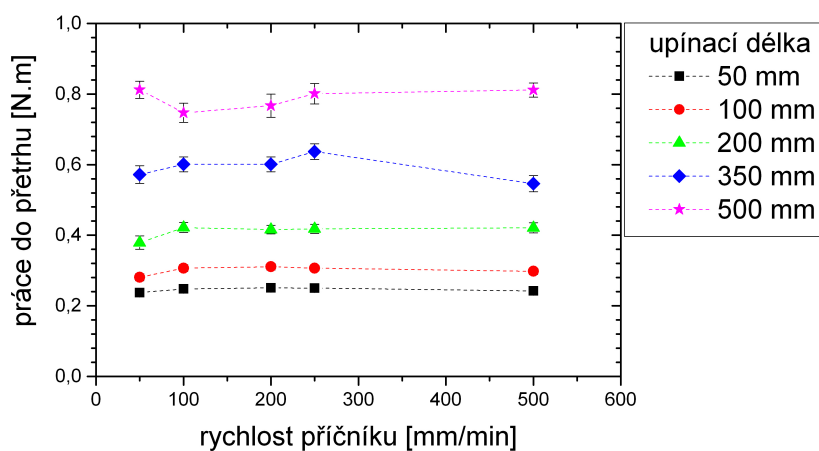
Obrázek 3.29: Vliv interakce obou faktorů na tažnost.

3.5.3 Práce do přetrhu



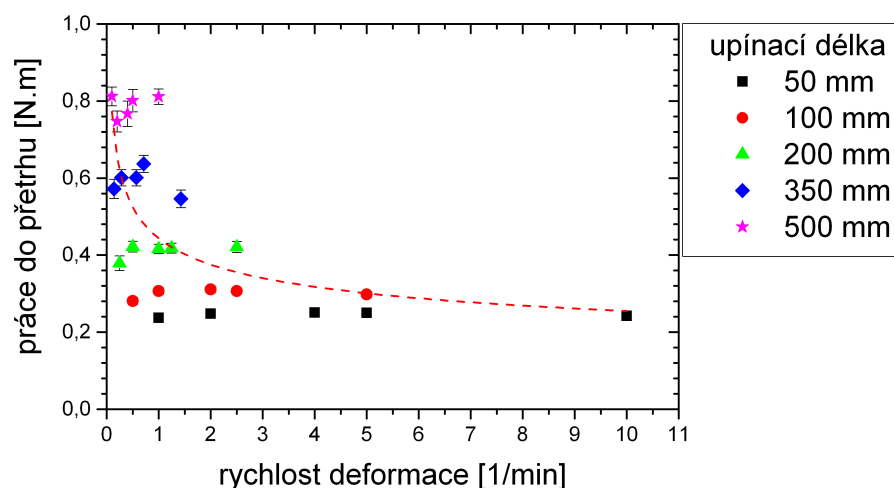
Obrázek 3.30: Závislost práce do přetrhu na upínací délce.

Hodnoty práce do přetrhu se zvyšují se zvyšující se upínací délkou, což je patrné z grafu 3.30.



Obrázek 3.31: Vliv rychlosti příčnicku na práci do přetrhu.

Graf 3.31 potvrzuje nevýznamnost vlivu příčnicku na práci do přetrhu, vzhledem k rozdílným průběhům křivek.



Obrázek 3.32: Závislost práce do přetrhu na rychlosti deformace.

Hodnoty práce do přetrhu v grafu 3.32 klesají s rostoucí rychlostí deformace.

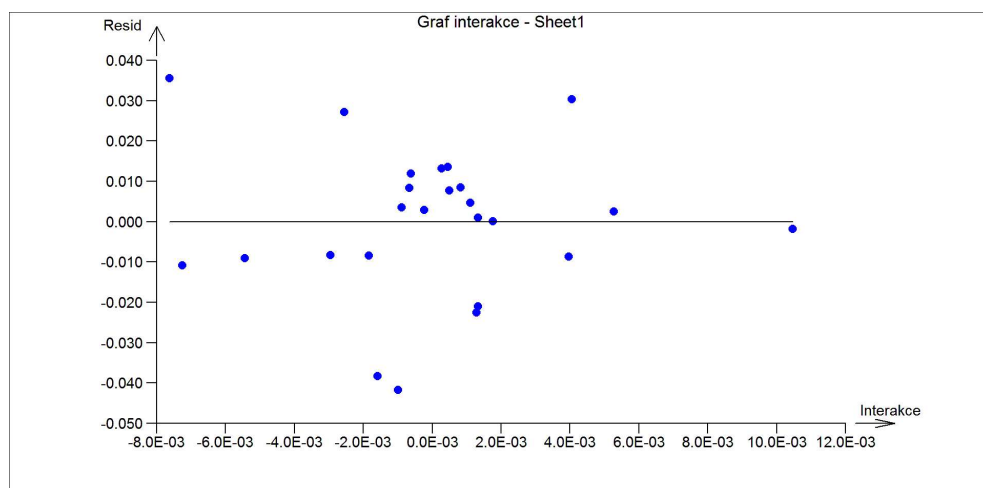
3.5.3.1 Analýza vlivu faktorů na práci do přetrhu pomocí ANOVA

Tabulka 3.12: Vliv upínací délky a rychlosti příčnicku na práci do přetrhu pro multifil z Kevlaru.

Zdroj variability	Součet čtverců	Průměrný čtverec	Stupně volnosti	Směr. odch.	F-kritérium	Kritický kvantil	Závěr
upínací délka [mm]	0,99	0,248	4	0,498	480,745	3,007	Významný
rych. příc. [mm/min]	0,002	0	4	0,022	0,922	3,007	Nevýznamný
Interakce	0	0	1	0,091	0,006	4,543	Nevýznamný
Rezidua	0,008	0,001	15	0,023			
Celkem	1	0,042	24	0,204			

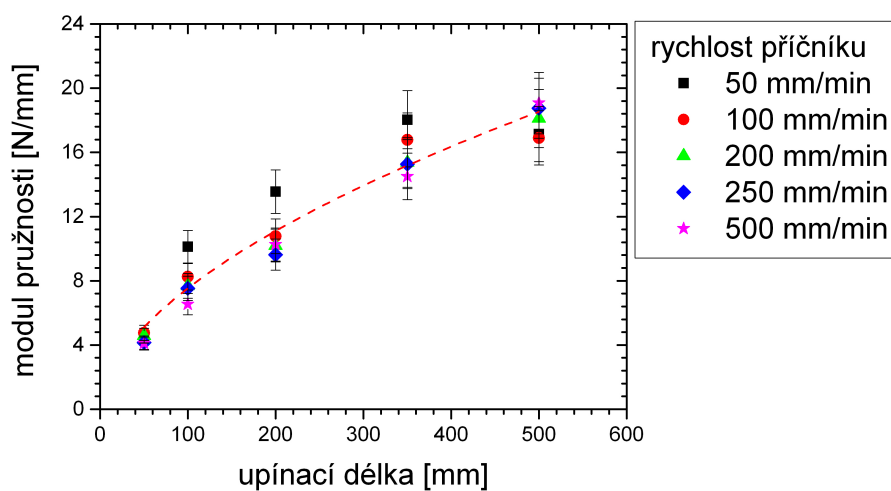
F-kritérium upínací délky značí její významný vliv na práci do přetrhu, faktor rychlosti příčnicku a interakce obou faktorů dosahují opět nízkých hodnot F-kritérií, které jsou nižší než kritický kvantil.

Významnost vlivu interakce graficky znázorněné na 3.33 se neprokázala, data nemají rostoucí trend.



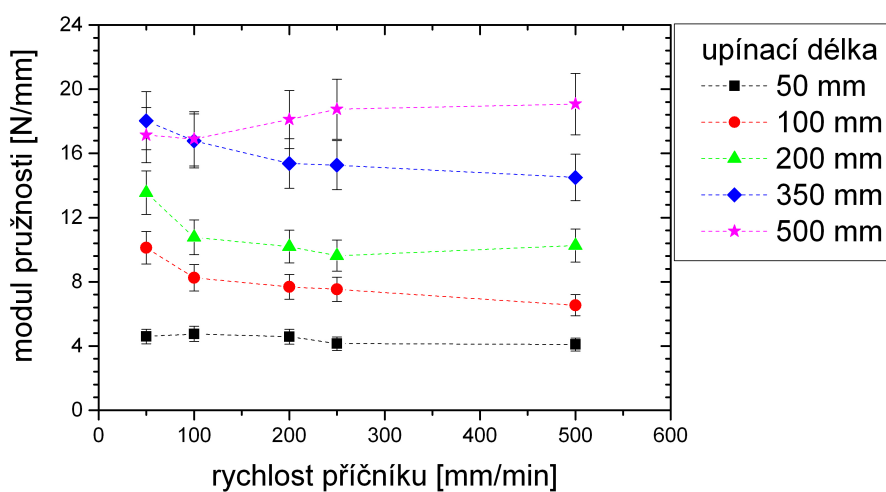
Obrázek 3.33: Vliv interakce obou faktorů na práci do přetruhu.

3.5.4 Modul pružnosti



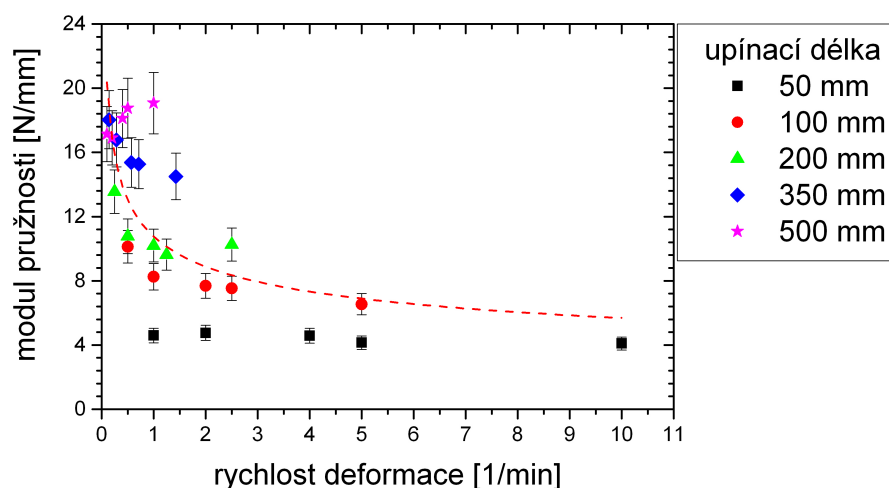
Obrázek 3.34: Závislost počátečního modulu na upínací délce.

V grafu modulu pružnosti 3.34 je zřejmý rostoucí trend, hodnoty modulu pružnosti v závislosti na zvyšující se upínací délce rostou.



Obrázek 3.35: Vliv rychlosti přičníku na počáteční modul.

Křivky grafu 3.35 nejsou stejného či podobného uspořádání, proto vliv rychlosti přičníku není významný.



Obrázek 3.36: Závislost modulu pružnosti na rychlosti deformace.

V tomto grafu 3.36 je patrný vliv rychlosti deformace na modul pružnosti, se zvyšující se rychlostí deformace klesá počáteční modul pružnosti.

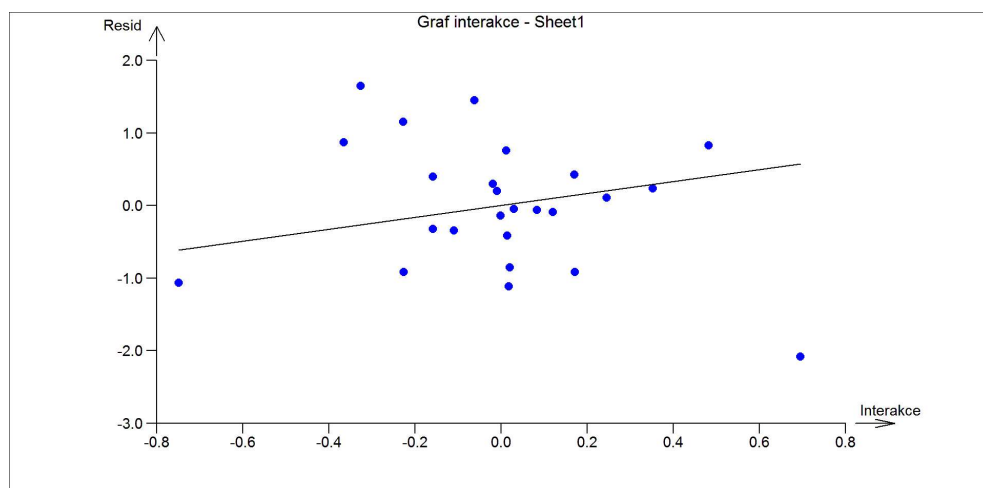
3.5.4.1 Analýza vlivu faktorů na modul pružnosti pomocí ANOVA

Tabulka 3.13: Vliv upínací délky a rychlosti příčnicku na počáteční modul pro multifil z Kevlaru.

Zdroj variability	Součet čtverců	Průměrný čtverec	Stupně volnosti	Směr. odch.	F-kritérium	Kritický kvantil	Závěr
upínací délka [mm]	623,459	155,865	4	12,485	136,804	3,007	Významný
rych. příc. [mm/min]	10,284	2,571	4	1,603	2,257	3,007	Nevýznamný
Interakce	0,819	0,819	1	4,27	0,706	4,543	Nevýznamný
Rezidua	17,41	1,161	15	1,077			
Celkem	651,972	27,165	24	5,212			

Počáteční modul je významně ovlivňován upínací délkou, která má vysokou hodnotu F-kritéria. Nevýznamnými podle F-testu jsou faktor rychlosti příčnicku a interakce obou faktorů.

Graf interakce 3.37 nenaznačuje vliv na počáteční modul, není zde patrný rostoucí trend dat.



Obrázek 3.37: Vliv interakce obou faktorů na počáteční modul.

3.5.5 Shrnutí výsledků pro multifil z Kevlaru

Multifil z Kevlaru nejvýznamněji ovlivňuje upínací délka, která má významný vliv na všechny mechanické vlastnosti (pevnost, tažnost, práce do přetrhu, počáteční modul).

Významnost vlivu rychlosti příčnicku se nepotvrdila zřejmě kvůli zvoleným nízkým hodnotám rychlosti pohybu příčnicku vzhledem k houževnatosti materiálu. Ovšem zvýšení této rychlosti nebylo možné, měřicí přístroj vyšší rychlost příčnicku neumožňoval.

Faktor rychlosti deformace nebyl shledán jako významný. Tento výsledek nebyl očekáván, dle zjištěných informací 2.5.4.2 by s rostoucí rychlostí deformace měla stoupat pevnost materiálu a klesat tažnost. Vezmeme-li v úvahu nízké, nevýznamné hodnoty rychlosti příčnicku a vysoké, významné hodnoty upínacích délek, které se podílí, není možné, aby se rychlost deformace stala významným vlivem.

Pevnost s rostoucí upínací délkou klesá, je zde potvrzena teorie nejslabšího článku ze sekce 2.5.4.1. V závislosti pevnosti na rychlosti deformace pevnost v grafu 3.24 stoupá, ale vliv rychlosti deformace není dle výsledků ANOVA významný, což není dle našich předpokladů.

Práce do přetrhu vykazuje závislost na upínací délce, s rostoucí upínací délkou vzrůstá práce do přetrhu. Vliv rychlosti příčnicku se v tomto případě nepotvrdil, proto závislost práce do přetrhu na rychlosti deformace vykazuje opačný, tedy klesající trend.

Pro závislost modulu pružnosti na upínací délce platí rostoucí trend, zatímco rychlost příčnicku modul pružnosti neovlivňuje. Dochází tak k poklesu modulu pružnosti se zvyšující se rychlostí deformace.

3.6 Příze z Kevlaru

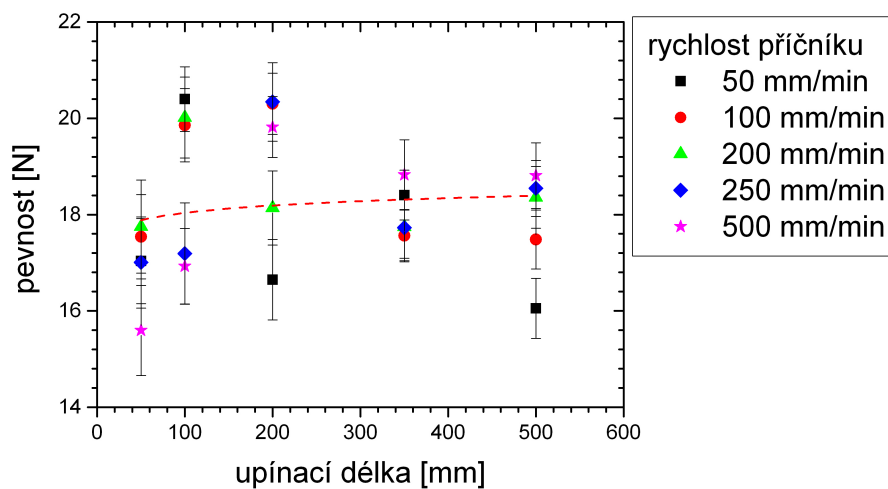
V tabulce níže jsou uvedeny určené průměrné hodnoty mechanicko-fyzikální vlastností. V příloze B jsou uvedeny základní statistické ukazatele pro jednotlivé veličiny.

Tabulka 3.14: Průměrné hodnoty mechanických vlastností pro přízi z Kevlaru.

upínací délka [mm]	rychlost příčnicku [mm/min]	rychlost deformace [1/min]	pevnost [N]	tažnost [%]	práce do přetrhu [N.m]	modul pružnosti [N/mm]
50	50	1	17,0	7,00	0,032	2,42
50	100	2	17,5	7,12	0,033	2,31
50	200	4	17,8	7,14	0,034	2,17
50	250	5	17,0	6,97	0,033	2,22
50	500	10	15,6	6,61	0,031	1,56
100	50	0,5	20,4	4,92	0,049	3,87
100	100	1	19,9	4,84	0,047	3,69
100	200	2	20,0	4,93	0,049	3,58
100	250	2,5	17,2	4,58	0,042	3,61
100	500	5	16,9	4,62	0,043	3,13
200	50	0,25	16,6	3,29	0,054	4,65
200	100	0,5	20,3	3,50	0,069	5,07
200	200	1	18,1	3,47	0,063	4,74
200	250	1,25	20,3	3,53	0,071	5,05
200	500	2,5	19,8	3,57	0,071	5,06
350	50	0,1	18,4	2,88	0,088	5,96
350	100	0,3	17,6	2,72	0,082	6,07
350	200	0,6	17,7	2,67	0,083	6,53
350	250	0,7	17,7	2,69	0,083	6,07
350	500	1,4	18,8	2,80	0,092	6,51
500	50	0,1	16,1	2,37	0,093	6,90
500	100	0,2	17,5	2,47	0,106	6,81
500	200	0,4	18,4	2,56	0,115	6,90
500	250	0,5	18,5	2,55	0,116	6,33
500	500	1	18,8	2,46	0,116	7,51

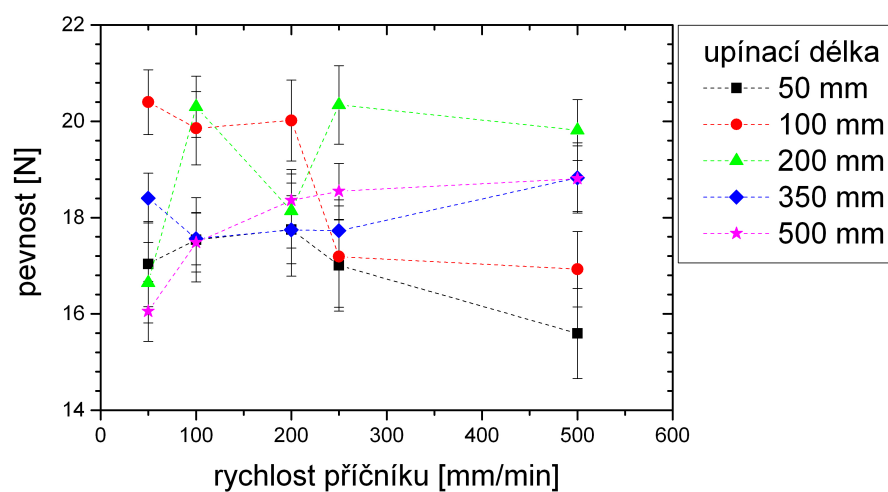
Z tabulky byly vytvořeny grafy pro závislosti mechanických vlastností na upínací délce, rychlosti příčnicku a rychlosti deformace. V následujících grafech jsou barevně vyznačeny jednotlivé rychlosti příčnicku, nebo upínací délky, a interval spolehlivosti (=konfidenční interval – interval, ve kterém s pravděpodobností 95% leží skutečná hodnota odhadované veličiny). Grafy byly proloženy křivkou pro lepší představu trendu a vedení oka.

3.6.1 Pevnost



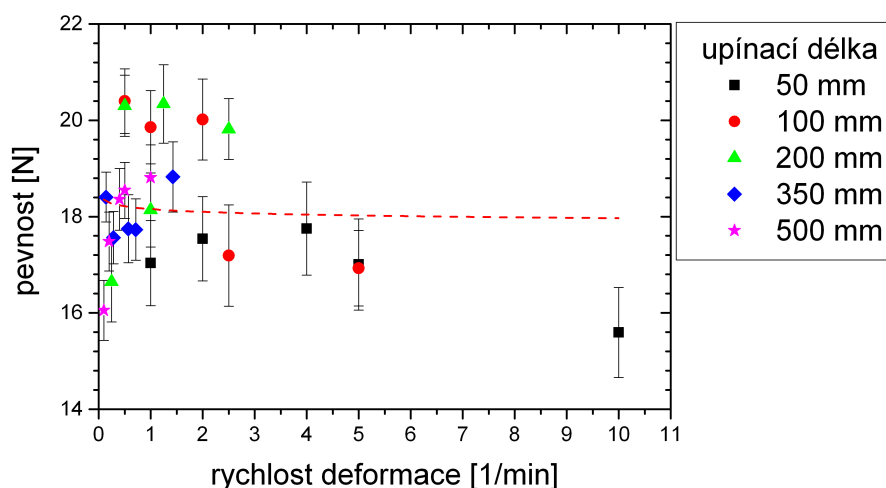
Obrázek 3.38: Závislost pevnosti na upínací délce.

Z grafu závislosti pevnosti na upínací délce 3.38 není patrný žádný vliv upínací délky na pevnost materiálu.



Obrázek 3.39: Vliv rychlosti příčnicku na pevnost.

Na obrázku 3.39 jsou rozdíly mezi průběhy křivek, tudíž zde není pozorován významný vliv rychlosti příčnicku.



Obrázek 3.40: Závislost pevnosti na rychlosti deformace.

V tomto grafu není patrný vliv rychlosti deformace na pevnost příže.

3.6.1.1 Analýza vlivu faktorů na pevnost pomocí ANOVA

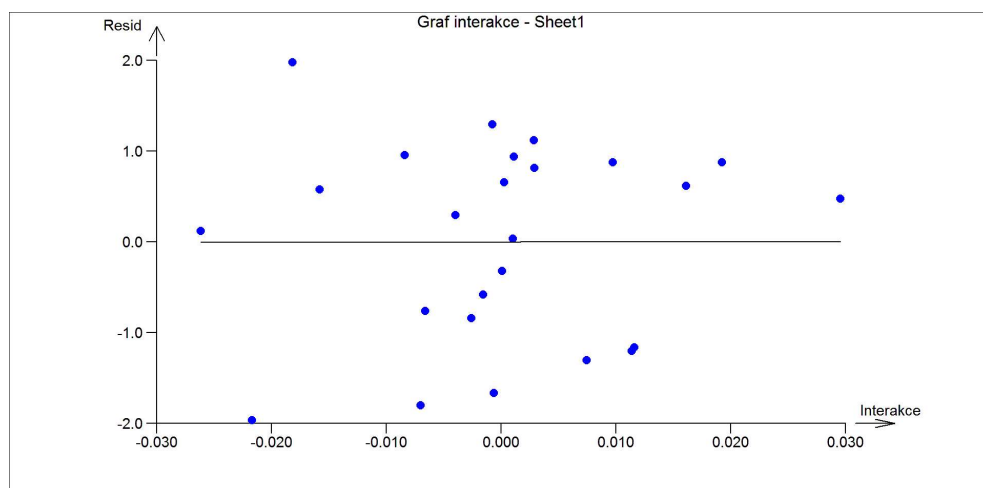
Z průměrných hodnot obsažených v tabulce 3.6 byly podle tabulky 2.2 vytvořeny tabulka níže. Vliv faktorů na pevnost materiálu je zobrazen na obrázcích 3.38 - 3.40.

Tabulka 3.15: Vliv upínací délky a rychlosti příčnicku na pevnost pro přízi z Kevlaru.

Zdroj variability	Součet čtverců	Průměrný čtverec	Stupně volnosti	Směr. odch.	F-kritérium	Kritický kvantil	Závěr
upínací délka [mm]	13,971	3,493	4	1,869	1,965	3,007	Nevýznamný
rych. příc. [mm/min]	2,209	0,552	4	0,743	0,311	3,007	Nevýznamný
Interakce	0,154	0,154	1	5,333	0,082	4,543	Nevýznamný
Rezidua	28,289	1,886	15	1,373			
Celkem	44,623	1,859	24	1,364			

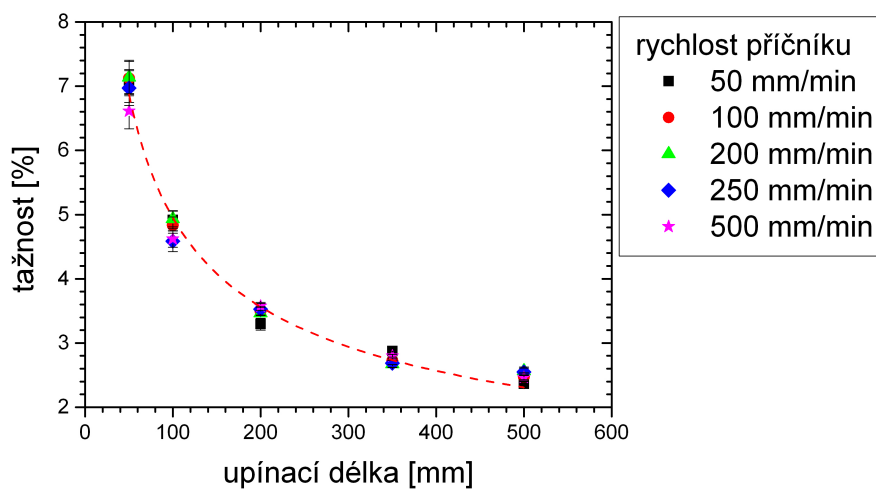
Tato tabulka poukazuje na nevýznamnost obou faktorů i jejich interakce, hodnoty F-kritérií jsou nižší než hodnoty kritického kvantilu, dochází tak k závěru, že zmíněné vlivy nejsou významné.

V grafu interakce 3.41 jsou body rozptýleny, není tak její vliv významný.



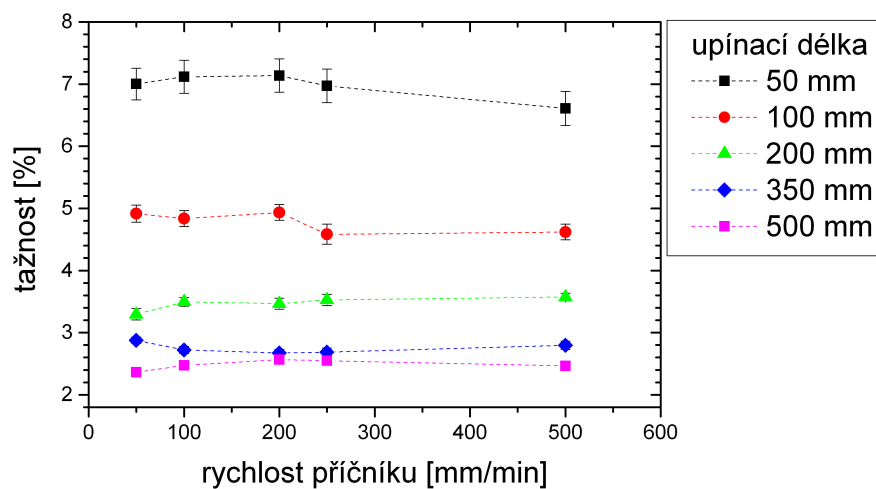
Obrázek 3.41: Vliv interakce obou faktorů na pevnost.

3.6.2 Tažnost



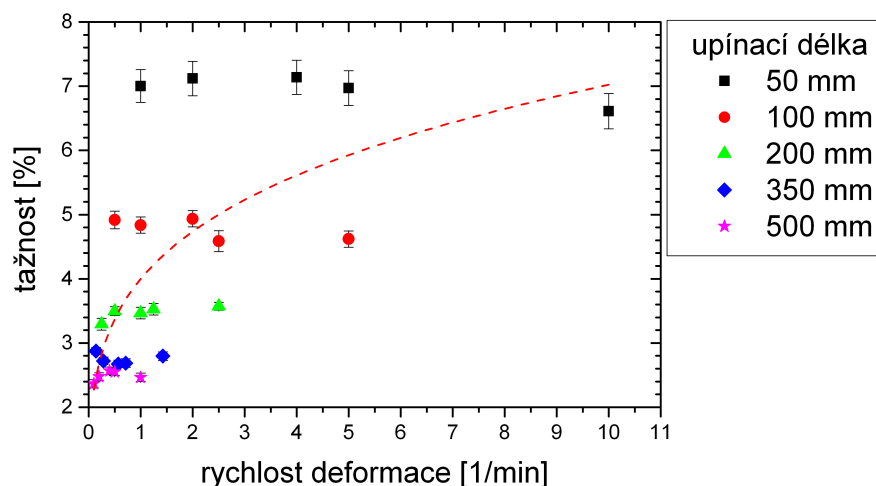
Obrázek 3.42: Závislost tažnosti na upínací délce.

Graf příže z Kevlaru 3.42 vykazuje klesající trend, tedy pokles hodnot tažnosti se zvyšující se upínací délkou.



Obrázek 3.43: Vliv rychlosti přičníku na tažnost.

Na obrázku 3.43 nepozorujeme vliv rychlosti přičníku na tažnost materiálu.



Obrázek 3.44: Závislost tažnosti na rychlosti deformace.

Celkově tažnost s rostoucí rychlostí deformace vzrůstá. Vzhledem k jednotlivým upínacím délkám není vliv rychlosti deformace nijak výrazný.

3.6.2.1 Analýza vlivu faktorů na tažnost pomocí ANOVA

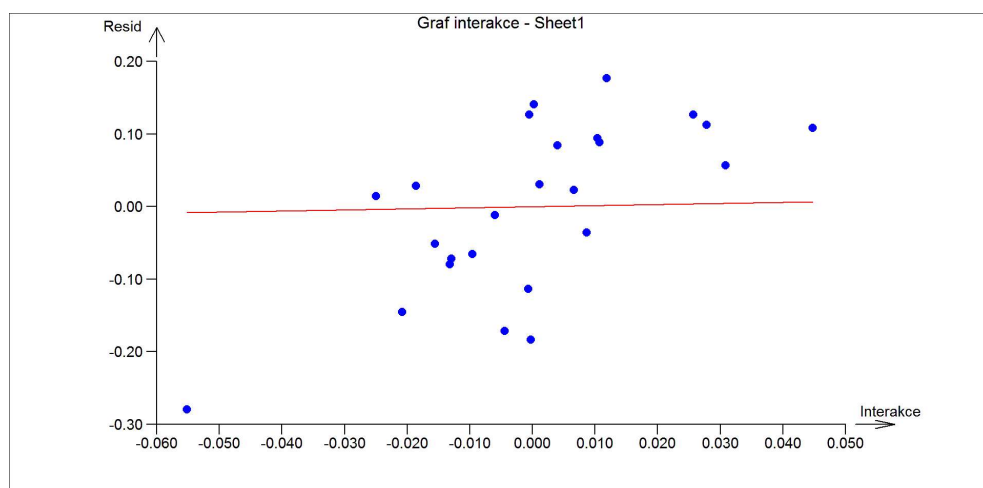
Tabulka 3.16: Vliv upínací délky a rychlosti příčnicku na tažnost přízi z Kevlaru.

Zdroj variability	Součet čtverců	Průměrný čtverec	Stupně volnosti	Směr. odch.	F-kritérium	Kritický kvantil	Závěr
upínací délka [mm]	67,548	16,887	4	4,109	823,102	3,007	Významný
rych. příč. [mm/min]	0,063	0,016	4	0,126	0,769	3,007	Nevýznamný
Interakce	0,148	0,148	1	0,573	12,37	4,543	Významný
Rezidua	0,18	0,012	15	0,11			
Celkem	67,939	2,831	24	1,683			

Výsledky statistického testu uvedené v tabulce říkají, že velmi významný vliv na tažnost materiálu má upínací délka.

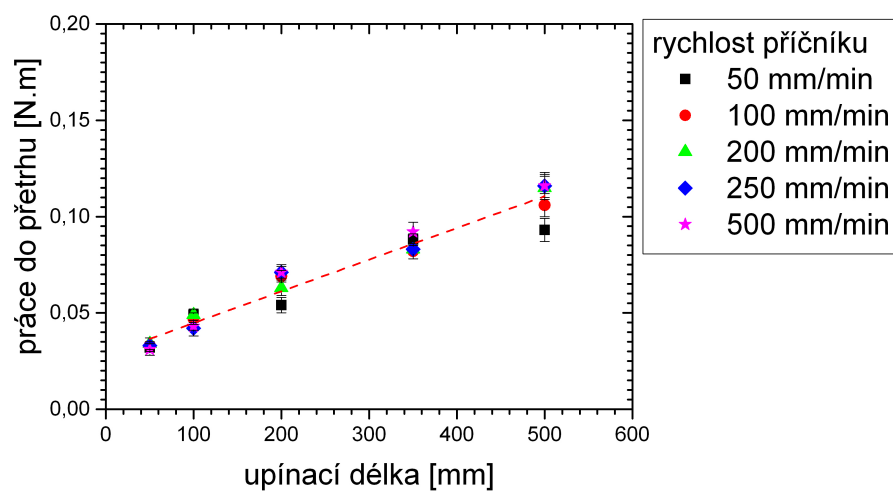
Jako nevýznamný vliv je uvedena rychlost příčnicku, která má nízkou hodnotu F-kritéria.

Interakce upínací délky a rychlosti příčnicku má podle tabulky významný vliv na tažnost, podíváme-li se do grafu 3.45, zjistíme, že se zde nachází jeden vychýlený bod, který možná tento výsledek zapříčiňuje.



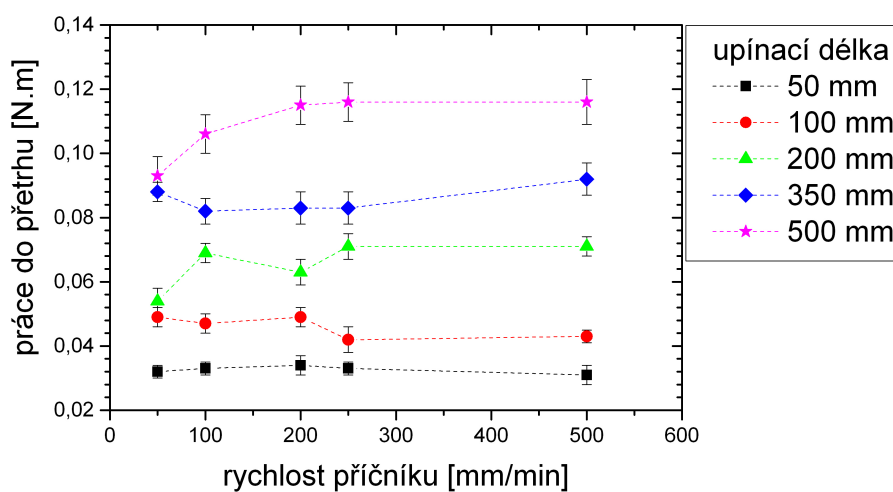
Obrázek 3.45: Vliv interakce obou faktorů na tažnost.

3.6.3 Práce do přetrhu



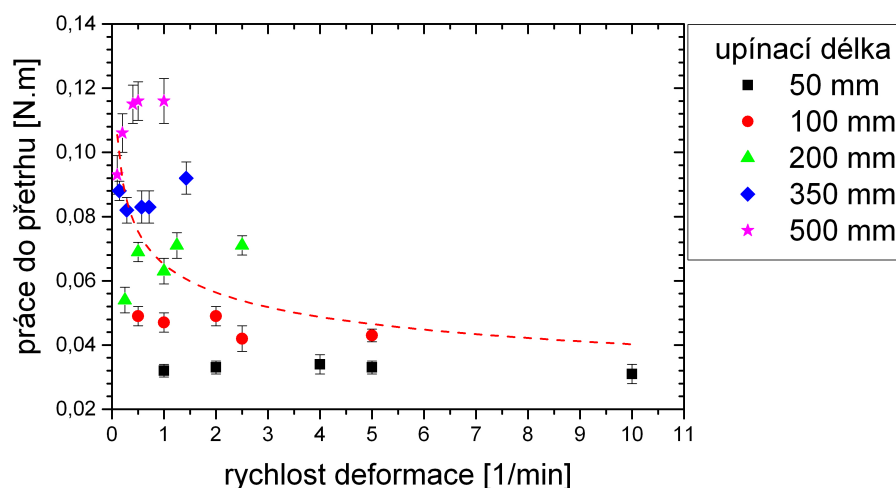
Obrázek 3.46: Závislost práce do přetrhu na upínací délce.

Graf závislosti práce do přetrhu na upínací délce pro kevlarovou přízi 3.46 vykazuje rostoucí trend, tudíž práce do přetrhu roste se zvyšující se upínací délkou.



Obrázek 3.47: Vliv rychlosti přičníku na práci do přetrhu.

Graf 3.47 nevykazuje vliv rychlosti přičníku na práci do přetrhu.



Obrázek 3.48: Závislost práce do přetrhu na rychlosti deformace.

Práce do přetrhu s rostoucí rychlostí deformace klesá.

3.6.3.1 Analýza vlivu faktorů na práci do přetrhu ANOVA

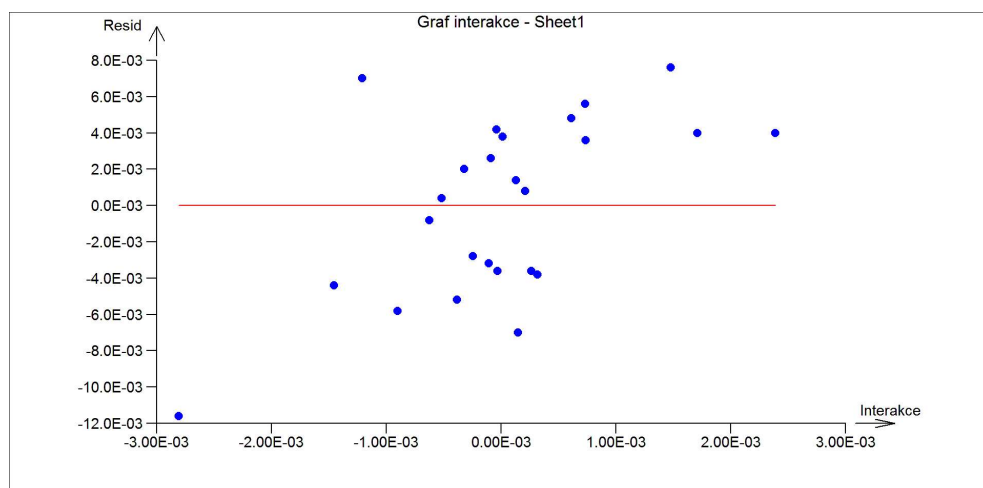
Tabulka 3.17: Vliv upínací délky a rychlosti příčnicku na práci do přetrhu pro přízi z Kevlaru.

Zdroj variability	Součet čtverců	Průměrný čtverec	Stupně volnosti	Směr. odch.	F-kritérium	Kritický kvantil	Závěr
upínací délka [mm]	0,019	0,005	4	0,068	130,568	3,007	Významný
rych. příc. [mm/min]	0	0	4	0,006	1,1	3,007	Nevýznamný
Interakce	0	0	1	0,024	8,312	4,543	Významný
Rezidua	0	0	15	0,005			
Celkem	0,019	0,001	24	0,028			

Z tabulky 3.17 lze vyčíst jednoznačný vliv upínací délky na práci do přetrhu, vysoká hodnota F-kritéria to jen potvrzuje.

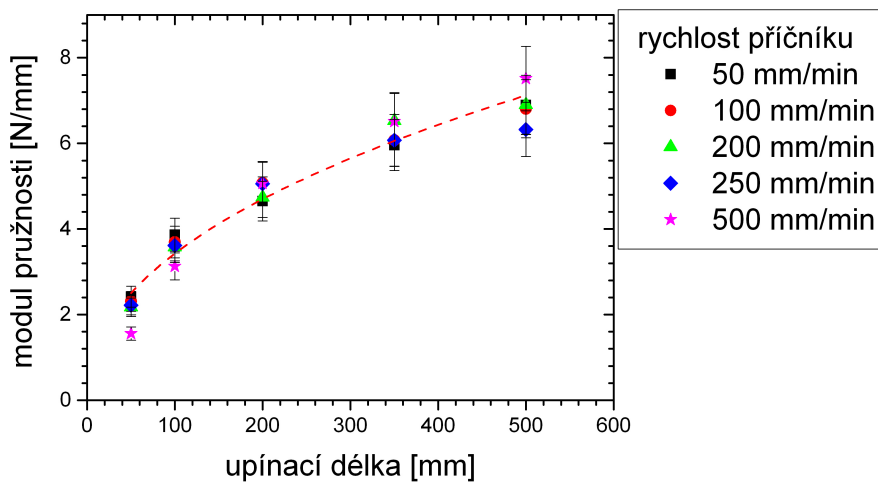
Rychlost příčnicku má nevýznamný vliv na práci do přetrhu, hodnota F-kritéria je nízká.

Interakce faktorů jakožto vliv na práci do přetrhu je v tabulce označena jako významná, v grafické podobě 3.49 je proložena červenou přímkou, čímž je významnost potvrzena.



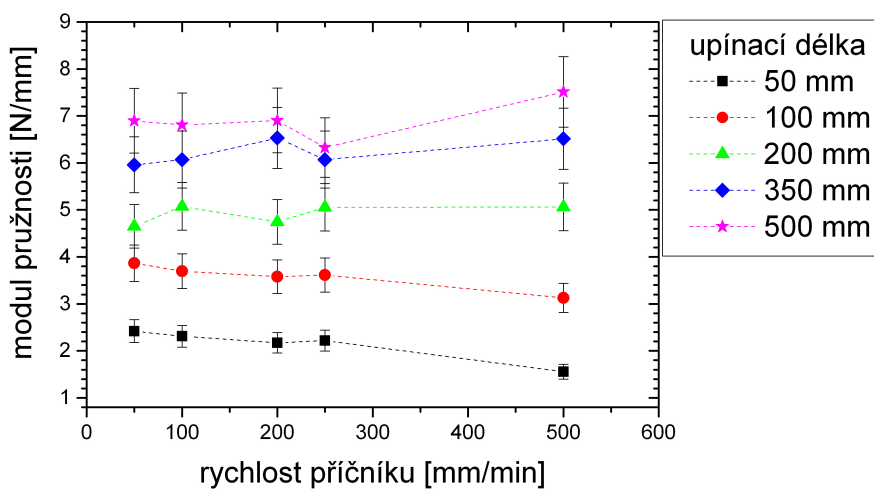
Obrázek 3.49: Vliv interakce obou faktorů na práci do přetrhu.

3.6.4 Modul pružnosti



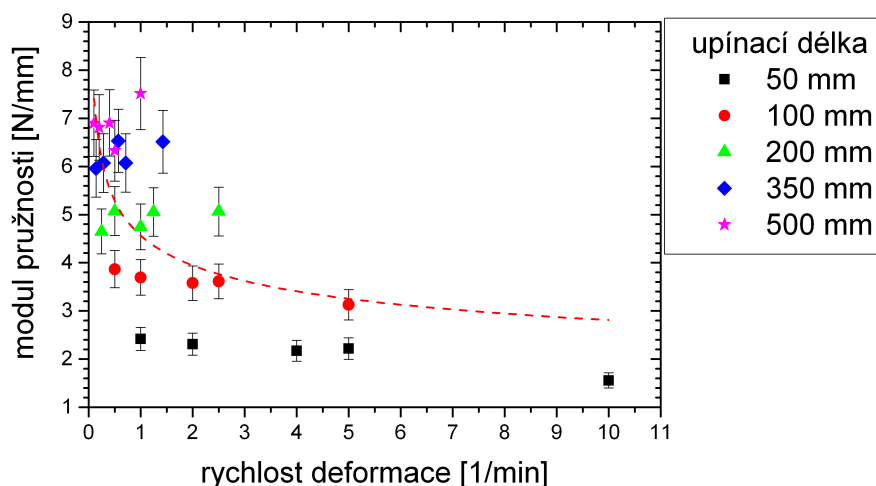
Obrázek 3.50: Závislost počáteční modul na upínací délce.

Tento graf 3.50 vykazuje značnou závislost modulu pružnosti na upínací délce. S rostoucí upínací délkou vzrůstá počáteční modul pružnosti.



Obrázek 3.51: Vliv rychlosti přičníku na počáteční modul.

Křivky grafu vlivu rychlosti přičníku na modul pružnosti nevykazují podobný průběh pro různé upínací délky.



Obrázek 3.52: Závislost počátečního modulu na rychlosti deformace.

Graf modulu pružnosti v závislosti na rychlosti deformace 3.52 ukazuje klesající trend, počáteční modul pružnosti klesá s rostoucí rychlostí deformace.

3.6.4.1 Analýza vlivu faktorů na modul pružnosti ANOVA

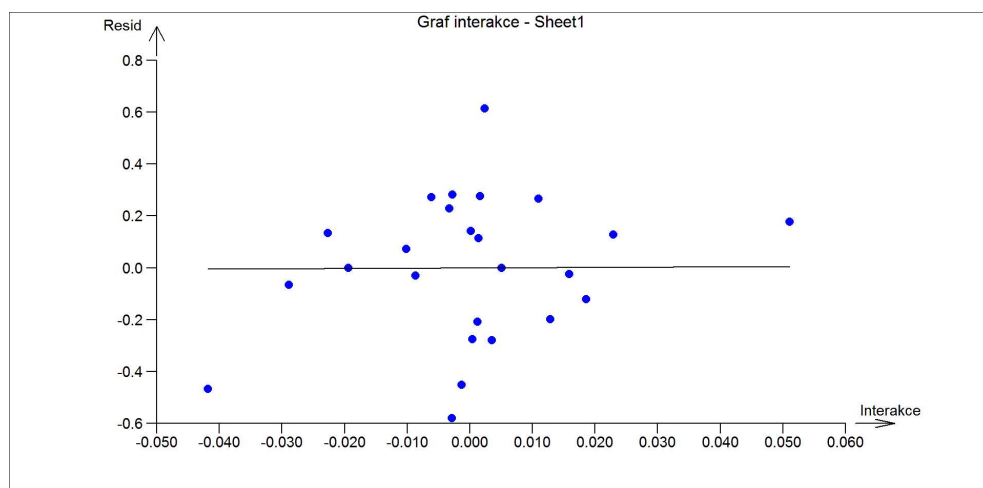
Tabulka 3.18: Vliv upínací délky a rychlosti příčnicku na počáteční modul pro přízi z Kevlaru.

Zdroj variability	Součet čtverců	Průměrný čtverec	Stupně volnosti	Směr. odch.	F-kritérium	Kritický kvantil	Závěr
upínací délka [mm]	75,069	18,767	4	4,332	160,581	3,007	Významný
rych. příc. [mm/min]	0,059	0,015	4	0,121	0,125	3,007	Nevýznamný
Interakce	0,1	0,1	1	1,367	0,851	4,543	Nevýznamný
Rezidua	1,77	0,118	15	0,343			
Celkem	76,998	3,208	24	1,791			

Také na počáteční modul má významný vliv upínací délka. Významnost vlivu upínací délky potvrzuje hodnota F-kritéria.

Rychlost příčnicku nemá významný vliv na počáteční modul, hodnota F-kritéria je nižší než kritický kvantil.

Vliv interakce obou faktorů není pro počáteční modul významný, data v grafu 3.53 nesplňují rostoucí trend, který je pro významnost nutný.



Obrázek 3.53: Vliv interakce obou faktorů na počáteční modul.

3.6.4.2 Shrnutí výsledků pro příze z Kevlaru

Kevlarová příze se svým chováním odlišuje od multifilů Twaronu a Kevlaru, což je pochopitelné vzhledem k jiné technologii výroby, jedná se o staplovou přízi vlnářského typu (jiná vnitřní struktura než u multifilu). Není zde pozorován vliv upínací délky na pevnost, ani vliv rychlosti deformace na pevnost.

Toto chování není považováno za standardní, neodpovídá předpokladům v teoretické části. Důvody neshody s teorií mohou být různé, u této příze, která je vlnářského typu, probíhá jiný druh přetrhu, než platí pro výše popsané multifily. Je také samozřejmé, že se zde mohl projevit vliv lidského faktoru vzhledem k mechanickému upínání vzorků do čelistí. Možnou příčinou mohly být nízké hodnoty rychlosti příčnicku, vezmeme-li v úvahu houževnatost materiálu a jeho upínací délku.

Ostatní mechanické vlastnosti příze z Kevlaru vykazují obdobné chování s multifily z Twaronu a Kevlaru.

4 Závěr

V této diplomové práci byl řešen vliv podmínek měření na mechanické vlastnosti vysoce pevných délkových útvarů (multifilů a příze) vzhledem k interním normám firem. Cílem práce bylo ověření významnosti vlivu těchto podmínek a případné navržené sjednocení jednotlivých norem.

Zkoumanými materiály byly multifil z Twaronu, multifil z Kevlaru a příze z Kevlaru. Měření bylo prováděno na trhacím přístroji Testometric M350-5 CT v klimatizovaném prostředí. Výsledkem měření byly tahové křivky pro různé upínací délky a rychlosti pohybu příčnicku. Každé měření s příslušnými parametry bylo opakováno 50 krát. Z těchto naměřených hodnot byly stanoveny hodnoty pevnosti, tažnosti a práce do přetrhu. Z jednotlivých dat pro tahové křivky byly vytvořeny průměrné tahové křivky, z těch byly odečteny hodnoty pro počáteční modul pružnosti.

Naměřená data byla statisticky zpracována, byly tak určeny základní statistické ukazatele. Následně byl proveden další statistický test a to dvoufaktorová analýza rozptylu (ANOVA), která určila významnost či nevýznamnost vlivů působících na mechanické vlastnosti zmíněných textilií. Za faktory byly voleny upínací délka a rychlost pohybu příčnicku. Z výsledků testu byl vyhodnocen jejich vliv a vzájemné interakce, která je v tomto případě označována za rychlost deformace. Výsledkem tohoto testu byl významný vliv upínací délky u multifilů (Twaron i Kevlar) na jejich mechanické vlastnosti – pevnost, tažnost, práce do přetrhu, počáteční modul pružnosti. Pro Twaron multifil byl pozorován významný vliv rychlosti deformace na pevnost, zatímco u Kevlaru multifilu nebyla zjištěna žádná statistická závislost mezi rychlostí deformace a jeho mechanickými vlastnostmi. Příze vykazovala rozdílné výsledky, upínací délka měla významný vliv na tažnost, práci do přetrhu a počáteční modul pružnosti, rychlost deformace významně ovlivňovala tažnost a práci do přetrhu.

Závěry tohoto statistického testu se v případě vlivu upínací délky shodují s teoretickými poznatky, avšak vliv rychlosti deformace teorii tolik neodpovídá.

Pro dané multifily se neprojevil významný vliv rychlosti deformace na žádnou z uvedených mechanických vlastností. Z toho vyplývá, že v normách je nutné striktně

uvádět velikost upínací délky, ale rychlost pohybu příčnicku lze pouze doporučit v rozmezí 50 - 500 mm/min. Předpokládaný významný vliv upínací délky také potvrdil nutnost testovat multifily z vysoce pevných materiálů při shodné upínací délce ve všech normách, jinak nebudou získané hodnoty mechanických vlastností dle různých norem srovnatelné.

Dalšími kroky v tomto výzkumu by bylo pozorování chování vysoce pevných materiálů při nastavení vyšších hodnot rychlosti pohybu příčnicku, čímž by se zvýšily i hodnoty rychlosti deformace. Tento experiment by se musel provádět na jiném trhačím přístroji, který umožňuje zvýšení rychlosti pohybu příčnicku nad 500 mm/min.

Literatura

- [1] David Milde, Katedra analytické chemie UPOL: Analýza rozptylu [online]. [cit. 3.5.2015], dostupné z <http://ach.upol.cz/user-files/intranet/09-anova-2011-1320420399.pdf>.
- [2] Dokoupilová, L.: *Vliv rychlosti deformace na pracovní tahové křivky přízí*. Diplomová práce, Technická Univerzita Liberec, Fakulta textilní, Liberec, 2007.
- [3] Dostalová, M.; Křivánková, M.: *Základy textilní a oděvní výroby*. Technická univerzita v Liberci, 2004, ISBN 80-7083-831-0.
- [4] Dupont: Kevlar Fibers [online]. [cit. 20.4.2015], dostupné z <http://www.dupont.com/products-and-services/fabrics-fibers-nonwovens/fibers/brands/kevlar/products/dupont-kevlar-fiber.html>.
- [5] Farsi Dooraki, B.; Nemes, J.; Bolduc, M.: Study of parameters affecting the strength of yarn. *JOURNAL DE PHYSIQUE IV*, ročník 134, 2006: s. 1183–1188, doi:10.1051/jp4:2006134180.
- [6] Iveta Bedáňová, VFU Brno: Analýza rozptylu (ANOVA) [online]. [cit. 3.5.2015], dostupné z <http://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn3/ANOVA.htm>.
- [7] Jaroslav Reichl: Encyklopedie fyziky - Síla pružnosti, normálové napětí [online]. [cit. 3.4.2015], dostupné z <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/630-sila-pruznosti-normalove-napeti>.
- [8] Jiří Neubauer, Katedra ekonometrie UO Brno: Analýza rozptylu, přednáška Statistika 2 [online]. [cit. 3.5.2015], dostupné z http://k101.unob.cz/~neubauer/pdf/analyza_rozptylu.pdf.
- [9] Kalabishka, Y.: *Studie vlastností a uplatnění "vysoce výkonných vláken" ve výrobcích ochranných oděvů a prostředků*. Diplomová práce, Technická Univerzita Liberec, Liberec, 2006.

- [10] Karel Procházka, strojka.opava.cz: Statická zkouška v tahu 2 [online]. [cit. 10.2.2015], dostupné z http://www.strojka.opava.cz/UserFiles/File/_sablony/KOM_III/VY_52_INOVACE_J-05-22.pdf.
- [11] Křemenáková, D.: *Systém projektování textilních struktur, část 1, vlákno-příze*. Liberec: TUL, 2004.
- [12] Kovačič, V.: *Zkoušení textilií 1 - Materiály pro výuku předmětu Zkoušení textilií*. TUL, 2002.
- [13] Kovačič, V.: *Přednášky pro předmět Oděvní materiály*. TUL, 2013.
- [14] Kučerová, I.; Doubravová, K.; Škrdlantová, M.; aj.: Mechanické zkoušení kovů [online]. [cit. 23.1.2015], dostupné z http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_mechanicke_zkouseni/teorie.htm.
- [15] Lim, J.; Zheng, J.; Masters, K.; aj.: Effect of gage length, loading rates, and damage on the strength of PPTA fibres. *International Journal of Impact Engineering*, ročník 38, 2011: s. 219–227.
- [16] Martin Krynický: Deformace, normálové napětí 2 [online]. [cit. 2.2.2015], dostupné z http://www.ucebnice.krynicky.cz/Fyzika/2_Molekulova_fyzika_a_termika/4_Pevne_skupenstvi/2405_Deformace_Normalove_napeti_II.pdf.
- [17] Milan Meloun, Univerzita Pardubice: Statistická analýza jednorozměrných dat [online]. [cit. 3.5.2015], dostupné z http://www.crr.vutbr.cz/system/files/prezentace_05_1101_5_1.pdf.
- [18] Militký, J.; Kovačič, V.: *Přednášky z předmětu Zkoušení textilií*. Liberec: TUL, 2001.
- [19] Militký, J.; Vaníček, J.: *Vlastnosti vláken - přednášky*. Liberec: TUL, 2015.
- [20] Neckář, B.: *Příze - tvorba, struktura, vlastnosti*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990, ISBN 80-03-00213-3, 32-35 s.
- [21] Odetka: Specifikace materiálu Twaron [online]. [cit. 10.4.2015], dostupné z http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat_twaron.aspx.
- [22] Odetka: Specifikace materiálu Kevlar [online]. [cit. 3.5.2015], dostupné z http://www.odetka.cz/net20/cz/hitech_snury_specmat_kevlar.aspx.

- [23] Úradníková, G.: *Vliv rychlosti deformace na pevnost a tažnost tkanin*. Diplomová práce, Technická Univerzita Liberec, Liberec, 2008.
- [24] Remeňová, I.: *Deformační vlastnosti skané příze*. Diplomová práce, Technická Univerzita Liberec, 2012.
- [25] Staněk, J.: *Nauka o textilních materiálech, Díl I 1, Část 4*. Liberec: Vysoká Škola strojní a textilní v Liberci, 1988.
- [26] Ústav fyziky a materiálového inženýrství UTB: Statické zkoušky krátkodobé [online]. [cit. 13.12.2014], dostupné z http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf.
- [27] Teijin Aramid: Twaron aramid fiber [online]. [cit. 10.4.2015], dostupné z <http://www.teijinaramid.com/aramids/twaron/>.
- [28] Vyšanská, M.: *Přednášky pro předmět UMT*. Liberec: TUL, 2014.
- [29] Wang, Y.; Xia, Y.: The effects of strain rate on mechanical behaviour of kevlar fibre bundless. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, ročník 29, è. 11, 1998: s. 1411–1415, doi:10.1016/S1359-835X(98)00038-4.
- [30] Zhu, D.; Mobasher, B.; Bansal, S.; aj.: Strain rate and gage lenght effects on tensile behavior of Kevlar 49 single yarn. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, ročník 43, è. 11, 2012: s. 2021–2029, doi: 10.1016/j.compositesa.2012.06.007.
- [31] Zhu, D.; Mobasher, B.; Rajan, S. D.: Experimental study of dynamic behavior of kevlar 49 single yarn. *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, ročník 1, 2011: s. 147–152, doi:10.1007/978-1-4419-8228-5.

Seznam obrázků

2.1	Kevlar. [22]	15
2.2	Ukázka použití Kevlaru (rukavice odolné proti prořezu.	15
2.3	Twaron.	16
2.4	Ukázka použití Twaronu (tažné lano).	16
2.5	Tahové křivky různých vláken (1 - len, 2 - bavlna, 3 - vlna, 4 - viskózní hedvábí, 5 - polyamid 66) [19].	23
2.6	Specifické body tahové křivky.	24
2.7	Nalezení bodu meze kluzu prahovým sklonem.	25
2.8	Nalezení bodu meze kluzu metodou vyrovnávací mezí kluzu.	26
2.9	Nalezení bodu meze kluzu metodou nulového sklonu.	26
2.10	Nalezení bodu meze kluzu metodou Meredithovy konstrukce.	27
2.11	Počáteční modul tahové křivky.	28
2.12	Tangentový modul tahové křivky.	28
2.13	Sekantový modul tahové křivky.	29
2.14	Výpočet deformační práce z tahové křivky.	29
2.15	Pevnost a kluz vláken při přetrhu příze z [25].	32
2.16	Závislost pevnosti a tažnosti na rychlosti deformace.	34
2.17	Srovnání naměřené a teoretické závislosti tahová křivky příze z Kevlaru 49.	36
3.1	Trhacím přístroji Testometric M350-5 CT.	42
3.2	Průměrná tahová křivka Twaron multifil pro upínací délku 250 mm při rychlosti pohybu příčnicku 250 mm·min ⁻¹	43
3.3	Průměrné tahové křivky pro různé upínací délky při rychlosti pohybu příčnicku 250 mm·min ⁻¹ pro multifil z Twaronu	44
3.4	Průměrné tahové křivky pro různé upínací délky při rychlosti pohybu příčnicku 250 mm·min ⁻¹ pro multifil z Kevlaru	45

3.5	Průměrné tahové křivky pro různé upínací délky při rychlosti pohybu příčnicku $250 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro přízi z Kevlaru	45
3.6	Závislost pevnosti na upínací délce.	47
3.7	Vliv rychlosti příčnicku na pevnost při různých upínacích délkách. . .	47
3.8	Závislost pevnosti na rychlosti deformace.	48
3.9	Vliv interakce obou faktorů na pevnost.	49
3.10	Závislost tažnosti na upínací délce.	50
3.11	Vliv rychlosti příčnicku na tažnost.	50
3.12	Závislost tažnosti na rychlosti deformace.	51
3.13	Vliv interakce obou faktorů na tažnost	52
3.14	Závislost práce do přetrhu na upínací délce.	53
3.15	Vliv rychlosti příčnicku na práci do přetrhu.	53
3.16	Závislost práce do přetrhu na rychlosti deformace.	54
3.17	Vliv interakce obou faktorů na práci do přetrhu.	55
3.18	Závislost počátečního modulu na upínací délce.	56
3.19	Vliv rychlosti příčnicku na počáteční modul.	56
3.20	Závislost počátečního modulu na rychlosti deformace.	57
3.21	Vliv interakce obou faktorů na počáteční modul.	58
3.22	Závislost pevnosti na upínací délce.	61
3.23	Vliv rychlosti příčnicku na pevnost.	61
3.24	Závislost pevnosti na rychlosti deformace.	62
3.25	Vliv interakce obou faktorů na pevnost.	63
3.26	Závislost tažnosti na upínací délce.	64
3.27	Vliv rychlosti příčnicku na tažnost.	64
3.28	Závislost tažnosti na rychlosti deformace.	65
3.29	Vliv interakce obou faktorů na tažnost.	66
3.30	Závislost práce do přetrhu na upínací délce.	67
3.31	Vliv rychlosti příčnicku na práci do přetrhu.	67
3.32	Závislost práce do přetrhu na rychlosti deformace.	68
3.33	Vliv interakce obou faktorů na práci do přetrhu.	69
3.34	Závislost počátečního modulu na upínací délce.	70
3.35	Vliv rychlosti příčnicku na počáteční modul.	70
3.36	Závislost modulu pružnosti na rychlosti deformace.	71
3.37	Vliv interakce obou faktorů na počáteční modul.	72
3.38	Závislost pevnosti na upínací délce.	75
3.39	Vliv rychlosti příčnicku na pevnost.	75

3.40	Závislost pevnosti na rychlosti deformace.	76
3.41	Vliv interakce obou faktorů na pevnost.	77
3.42	Závislost tažnosti na upínací délce.	78
3.43	Vliv rychlosti příčnicku na tažnost.	78
3.44	Závislost tažnosti na rychlosti deformace.	79
3.45	Vliv interakce obou faktorů na tažnost.	80
3.46	Závislost práce do přetrhu na upínací délce.	81
3.47	Vliv rychlosti příčnicku na práci do přetrhu.	81
3.48	Závislost práce do přetrhu na rychlosti deformace.	82
3.49	Vliv interakce obou faktorů na práci do přetrhu.	83
3.50	Závislost počáteční modul na upínací délce.	84
3.51	Vliv rychlosti příčnicku na počáteční modul.	84
3.52	Závislost počátečního modulu na rychlosti deformace.	85
3.53	Vliv interakce obou faktorů na počáteční modul.	86
A.1	Tahové křivky (Twaron multifil) pro rychlost příčnicku 50 mm·min ⁻¹ pro různé upínací délky.	99
A.2	Tahové křivky (Twaron multifil) pro rychlost příčnicku 100 mm·min ⁻¹ pro různé upínací délky.	99
A.3	Tahové křivky (Twaron multifil) pro rychlost příčnicku 200 mm·min ⁻¹ pro různé upínací délky.	100
A.4	Tahové křivky (Twaron multifil) pro rychlost příčnicku 250 mm·min ⁻¹ pro různé upínací délky.	100
A.5	Tahové křivky (Twaron multifil) pro rychlost příčnicku 500 mm·min ⁻¹ pro různé upínací délky.	100
A.6	Tahové křivky (Kevlar multifil) pro rychlost příčnicku 50 mm·min ⁻¹ pro různé upínací délky.	101
A.7	Tahové křivky (Kevlar multifil) pro rychlost příčnicku 100 mm·min ⁻¹ pro různé upínací délky.	101
A.8	Tahové křivky (Kevlar multifil) pro rychlost příčnicku 200 mm·min ⁻¹ pro různé upínací délky.	101
A.9	Tahové křivky (Kevlar multifil) pro rychlost příčnicku 250 mm·min ⁻¹ pro různé upínací délky.	102
A.10	Tahové křivky (Kevlar multifil) pro rychlost příčnicku 500 mm·min ⁻¹ pro různé upínací délky.	102
A.11	Tahové křivky (Kevlar příze) pro rychlost příčnicku 50 mm·min ⁻¹ pro různé upínací délky.	102

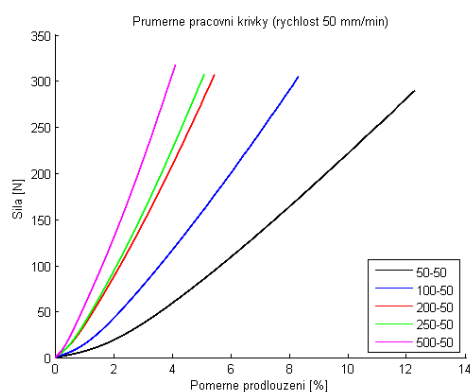
A.12 Tahové křivky (Kevlar příze) pro rychlost přičníku $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro různé upínací délky.	103
A.13 Tahové křivky (Kevlar příze) pro rychlost přičníku $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro různé upínací délky.	103
A.14 Tahové křivky (Kevlar příze) pro rychlost přičníku $250 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro různé upínací délky.	103
A.15 Tahové křivky (Kevlar příze) pro rychlost přičníku $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro různé upínací délky.	104

Seznam tabulek

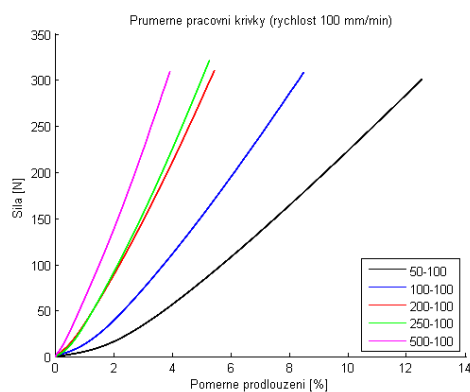
2.1	Mřížková struktura pro faktory A a B	39
2.2	Vyvážená dvoufaktorová analýza rozptylu.	40
3.1	Měření vzorky a jejich parametry.	41
3.2	Vypočtená hodnota rychlosti deformace $[min^{-1}]$ pro jednotlivé upínací délky a rychlosti příčnicku pro Twaron.	42
3.3	Vypočtená hodnota rychlosti deformace $[min^{-1}]$ pro jednotlivé upínací délky a rychlosti příčnicku pro Kevlar multifil a přízi.	43
3.4	Průměrné hodnoty mechanických vlastností pro multifil z Twaronu.	46
3.5	Vliv upínací délky a rychlosti příčnicku na pevnost pro multifil z Twa- ronu.	48
3.6	Vliv upínací délky a rychlosti příčnicku na tažnost pro Twaron multifil.	51
3.7	Vliv upínací délky a rychlosti příčnicku na práci do přetrhu pro multifil z Twaronu.	54
3.8	Vliv upínací délky a rychlosti příčnicku na počáteční modul pro Twa- ron multifil.	57
3.9	Průměrné hodnoty mechanických vlastností pro multifil z Kevlaru.	60
3.10	Vliv upínací délky a rychlosti příčnicku na pevnost pro multifil z Kevlaru.	62
3.11	Vliv upínací délky a rychlosti příčnicku na tažnost pro Kevlar multifil.	65
3.12	Vliv upínací délky a rychlosti příčnicku na práci do přetrhu pro multifil z Kevlaru.	68
3.13	Vliv upínací délky a rychlosti příčnicku na počáteční modul pro multifil z Kevlaru.	71
3.14	Průměrné hodnoty mechanických vlastností pro přízi z Kevlaru.	74
3.15	Vliv upínací délky a rychlosti příčnicku na pevnost pro přízi z Kevlaru.	76
3.16	Vliv upínací délky a rychlosti příčnicku na tažnost přízi z Kevlaru.	79
3.17	Vliv upínací délky a rychlosti příčnicku na práci do přetrhu pro přízi z Kevlaru.	82

3.18	Vliv upínací délky a rychlosti příčnicku na počáteční modul pro přízi z Kevlaru.	85
B.1	Základní statistické charakteristiky pro Twaron multifil s upínací délkou 50 mm.	105
B.2	Základní statistické charakteristiky pro Twaron multifil s upínací délkou 100 mm.	106
B.3	Základní statistické charakteristiky pro Twaron multifil s upínací délkou 200 mm.	106
B.4	Základní statistické charakteristiky pro Twaron multifil s upínací délkou 250 mm.	107
B.5	Základní statistické charakteristiky pro Twaron multifil s upínací délkou 500 mm.	107
B.6	Základní statistické charakteristiky pro Kevlar multifil s upínací délkou 50 mm.	108
B.7	Základní statistické charakteristiky pro Kevlar multifil s upínací délkou 100 mm.	108
B.8	Základní statistické charakteristiky pro Kevlar multifil s upínací délkou 200 mm.	109
B.9	Základní statistické charakteristiky pro Kevlar multifil s upínací délkou 350 mm.	109
B.10	Základní statistické charakteristiky pro Kevlar multifil s upínací délkou 500 mm.	110
B.11	Základní statistické charakteristiky pro Kevlar příze s upínací délkou 50 mm.	110
B.12	Základní statistické charakteristiky pro Kevlar příze s upínací délkou 100 mm.	111
B.13	Základní statistické charakteristiky pro Kevlar příze s upínací délkou 200 mm.	111
B.14	Základní statistické charakteristiky pro Kevlar příze s upínací délkou 350 mm.	112
B.15	Základní statistické charakteristiky pro Kevlar příze s upínací délkou 500 mm.	112

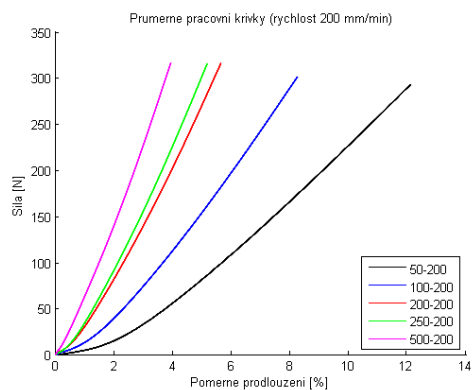
A Příloha průměrné tahové křivky



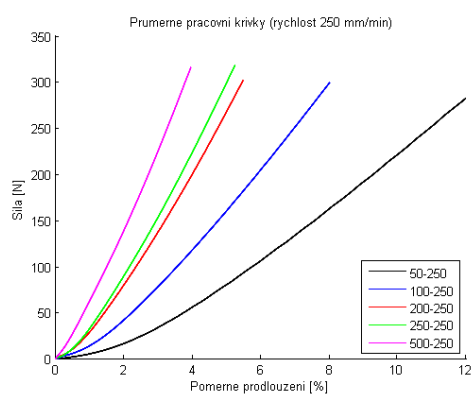
Obrázek A.1: Tahové křivky (Twaron multifil) pro rychlost přičníku $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro různé upínací délky.



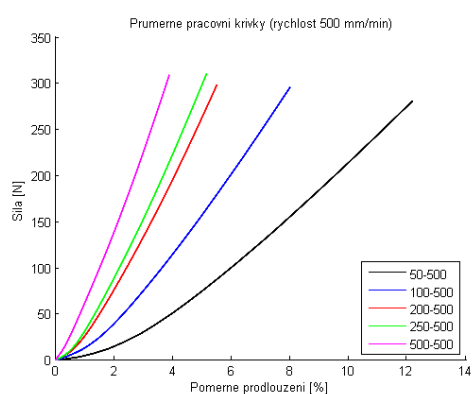
Obrázek A.2: Tahové křivky (Twaron multifil) pro rychlost přičníku $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro různé upínací délky.



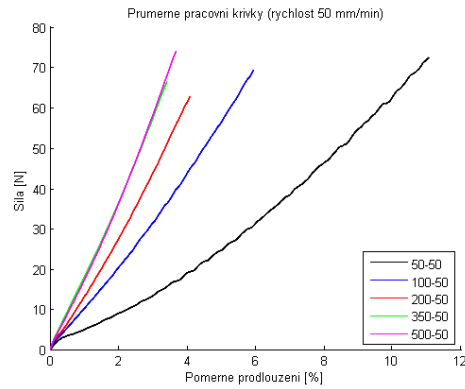
Obrázek A.3: Tahové křivky (Twaron multifil) pro rychlost přičníku $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro různé upínací délky.



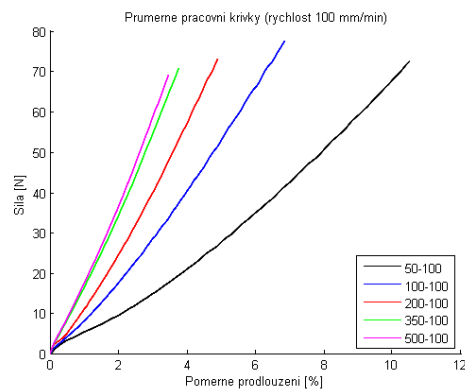
Obrázek A.4: Tahové křivky (Twaron multifil) pro rychlost přičníku $250 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro různé upínací délky.



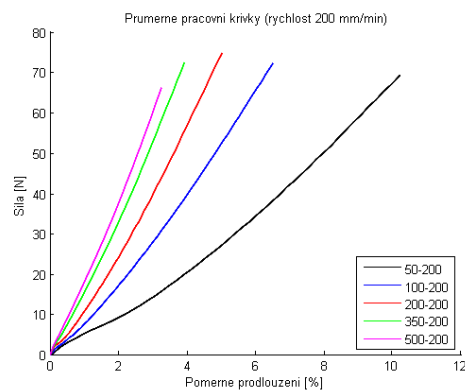
Obrázek A.5: Tahové křivky (Twaron multifil) pro rychlost přičníku $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro různé upínací délky.



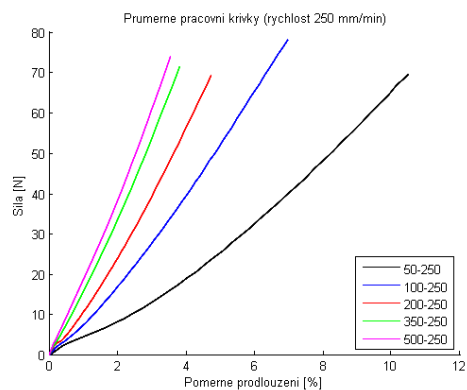
Obrázek A.6: Tahové křivky (Kevlar multifil) pro rychlost přičníku $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro různé upínací délky.



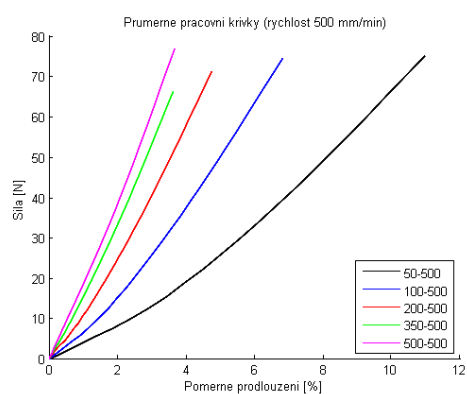
Obrázek A.7: Tahové křivky (Kevlar multifil) pro rychlost přičníku $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro různé upínací délky.



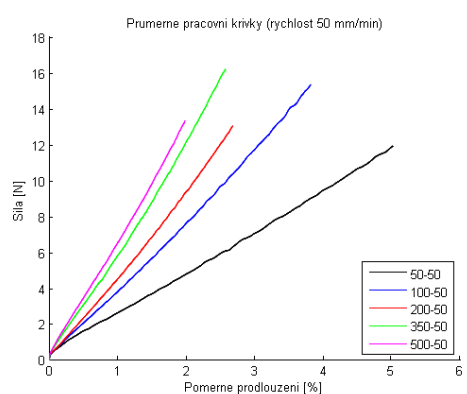
Obrázek A.8: Tahové křivky (Kevlar multifil) pro rychlost přičníku $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro různé upínací délky.



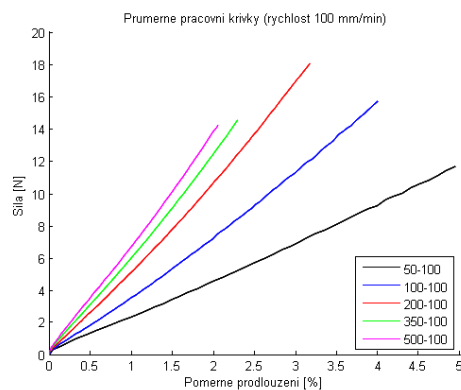
Obrázek A.9: Tahové křivky (Kevlar multifil) pro rychlost příčnicku $250 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro různé upínací délky.



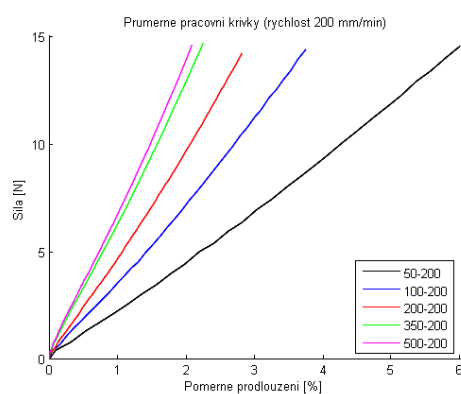
Obrázek A.10: Tahové křivky (Kevlar multifil) pro rychlost příčnicku $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro různé upínací délky.



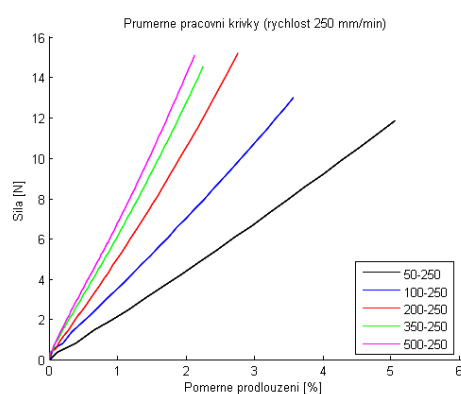
Obrázek A.11: Tahové křivky (Kevlar příze) pro rychlost příčnicku $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro různé upínací délky.



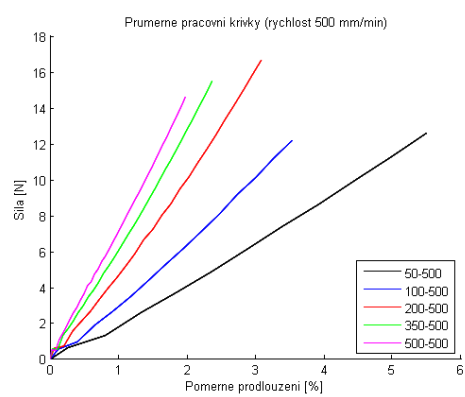
Obrázek A.12: Tahové křivky (Kevlar příze) pro rychlost příčnicku $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro různé upínací délky.



Obrázek A.13: Tahové křivky (Kevlar příze) pro rychlost příčnicku $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro různé upínací délky.



Obrázek A.14: Tahové křivky (Kevlar příze) pro rychlost příčnicku $250 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro různé upínací délky.



Obrázek A.15: Tahové křivky (Kevlar příze) pro rychlost přičníku $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro různé upínací délky.

B Příloha základní statistické charakteristiky

Tabulka B.1: Základní statistické charakteristiky pro Twaron multifil s upínací délkou 50 mm.

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Interval spolehlivosti	Dolní mez IS	Horní mez IS
50_50						
pevnost [N]	347,60	10,76	3,10	2,98	344,62	350,59
tažnost [%]	14,14	0,98	6,90	0,27	13,87	14,41
práce do přetrhu [N.m]	1,07	0,06	6,08	0,02	1,05	1,08
50_100						
pevnost [N]	351,83	10,17	2,89	2,82	349,01	354,65
tažnost [%]	14,14	0,71	5,02	0,20	13,95	14,34
práce do přetrhu [N.m]	1,06	0,06	5,60	0,02	1,04	1,08
50_200						
pevnost [N]	350,11	8,25	2,36	2,29	347,82	352,39
tažnost [%]	13,92	0,84	6,04	0,23	13,69	14,16
práce do přetrhu [N.m]	1,03	0,05	5,33	0,02	1,01	1,04
50_250						
pevnost [N]	348,61	9,10	2,61	2,52	346,08	351,13
tažnost [%]	14,06	0,83	5,89	0,23	13,83	14,29
práce do přetrhu [N.m]	1,04	0,05	4,84	0,01	1,02	1,05
50_500						
pevnost [N]	334,45	12,66	3,79	3,51	330,95	337,96
tažnost [%]	13,86	0,92	6,64	0,25	13,61	14,12
práce do přetrhu [N.m]	0,96	0,07	7,65	0,02	0,94	0,98

Tabulka B.2: Základní statistické charakteristiky pro Twaron multifil s upínací délkou 100 mm.

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Interval spolehlivosti	Dolní mez IS	Horní mez IS
100_50						
pevnost [N]	334,30	10,36	3,10	2,87	331,43	337,17
tažnost [%]	8,96	0,32	3,53	0,09	8,88	9,05
práce do přetrhu [N.m]	1,31	0,07	5,23	0,02	1,29	1,33
100_100						
pevnost [N]	329,55	7,71	2,34	2,14	327,42	331,69
tažnost [%]	8,96	0,31	3,51	0,09	8,87	9,05
práce do přetrhu [N.m]	1,27	0,05	4,20	0,01	1,25	1,28
100_200						
pevnost [N]	334,54	9,00	2,69	2,50	332,04	337,04
tažnost [%]	9,00	0,39	4,31	0,11	8,89	9,11
práce do přetrhu [N.m]	1,29	0,06	4,75	0,02	1,27	1,31
100_250						
pevnost [N]	334,22	8,44	2,53	2,34	331,88	336,56
tažnost [%]	8,72	0,28	3,23	0,08	8,65	8,80
práce do přetrhu [N.m]	1,26	0,05	4,08	0,01	1,24	1,27
100_500						
pevnost [N]	330,74	8,11	2,45	2,25	328,49	332,99
tažnost [%]	8,71	0,33	3,78	0,09	8,62	8,80
práce do přetrhu [N.m]	1,23	0,06	4,50	0,02	1,21	1,24

Tabulka B.3: Základní statistické charakteristiky pro Twaron multifil s upínací délkou 200 mm.

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Interval spolehlivosti	Dolní mez IS	Horní mez IS
200_50						
pevnost [N]	330,38	9,32	2,82	2,58	327,80	332,96
tažnost [%]	5,79	0,18	3,07	0,05	5,74	5,84
práce do přetrhu [N.m]	1,72	0,08	4,63	0,02	1,69	1,74
200_100						
pevnost [N]	333,61	8,71	2,61	2,41	331,20	336,02
tažnost [%]	5,77	0,14	2,50	0,04	5,73	5,81
práce do přetrhu [N.m]	1,72	0,08	4,37	0,02	1,70	1,74
200_200						
pevnost [N]	335,69	6,44	1,92	1,78	333,91	337,47
tažnost [%]	5,92	0,13	2,15	0,04	5,89	5,96
práce do přetrhu [N.m]	1,74	0,06	3,33	0,02	1,73	1,76
200_250						
pevnost [N]	335,45	7,27	2,17	2,02	333,44	337,47
tažnost [%]	5,96	0,20	3,42	0,06	5,90	6,02
práce do přetrhu [N.m]	1,74	0,08	4,38	0,02	1,72	1,76
200_500						
pevnost [N]	332,23	9,64	2,90	2,67	329,56	334,90
tažnost [%]	5,96	0,30	5,09	0,08	5,87	6,04
práce do přetrhu [N.m]	1,71	0,10	5,98	0,03	1,68	1,74

Tabulka B.4: Základní statistické charakteristiky pro Twaron multifil s upínací délkou 250 mm.

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Interval spolehlivosti	Dolní mez IS	Horní mez IS
250_50						
pevnost [N]	328,65	11,11	3,38	3,08	325,57	331,73
tažnost [%]	5,37	0,16	2,98	0,04	5,33	5,42
práce do přetrhu [N.m]	1,96	0,11	5,62	0,03	1,93	1,99
250_100						
pevnost [N]	335,19	9,74	2,91	2,70	332,49	337,89
tažnost [%]	5,44	0,14	2,56	0,04	5,40	5,48
práce do přetrhu [N.m]	2,00	0,10	4,91	0,03	1,97	2,02
250_200						
pevnost [N]	333,14	8,69	2,61	2,41	330,73	335,54
tažnost [%]	5,41	0,11	2,02	0,03	5,38	5,44
práce do přetrhu	1,97	0,09	4,50	0,02	1,94	1,99
250_250						
pevnost [N]	336,14	8,29	2,47	2,30	333,84	338,43
tažnost [%]	5,48	0,14	2,54	0,04	5,44	5,52
práce do přetrhu [N.m]	2,00	0,09	4,46	0,02	1,98	2,03
250_500						
pevnost [N]	333,17	11,14	3,34	3,09	330,08	336,26
tažnost [%]	5,44	0,18	3,24	0,05	5,40	5,49
práce do přetrhu [N.m]	1,97	0,12	6,07	0,03	1,93	2,00

Tabulka B.5: Základní statistické charakteristiky pro Twaron multifil s upínací délkou 500 mm.

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Interval spolehlivosti	Dolní mez IS	Horní mez IS
500_50						
pevnost [N]	330,27	8,26	2,50	2,29	327,98	332,56
tažnost [%]	4,23	0,10	2,26	0,03	4,20	4,25
práce do přetrhu [N.m]	3,12	0,13	4,11	0,04	3,09	3,16
500_100						
pevnost [N]	329,29	12,19	3,70	3,38	325,91	332,67
tažnost [%]	4,11	0,14	3,44	0,04	4,07	4,15
práce do přetrhu [N.m]	3,10	0,19	6,18	0,05	3,05	3,15
500_200						
pevnost [N]	336,21	7,65	2,28	2,12	334,09	338,34
tažnost [%]	4,14	0,09	2,19	0,03	4,12	4,17
práce do přetrhu [N.m]	3,18	0,12	3,87	0,03	3,15	3,21
500_250						
pevnost [N]	333,16	9,66	2,90	2,68	330,48	335,83
tažnost [%]	4,14	0,11	2,63	0,03	4,11	4,17
práce do přetrhu [N.m]	3,14	0,15	4,93	0,04	3,10	3,18
500_500						
pevnost [N]	327,24	11,85	3,62	3,28	323,96	330,53
tažnost [%]	4,08	0,13	3,16	0,04	4,04	4,11
práce do přetrhu [N.m]	3,03	0,19	6,34	0,05	2,98	3,09

Tabulka B.6: Základní statistické charakteristiky pro Kevlar multifil s upínací délkou 50 mm.

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Interval spolehlivosti	Dolní mez IS	Horní mez IS
50_50						
pevnost [N]	85,24	5,44	6,38	1,52	83,71	86,76
tažnost [%]	12,57	1,15	9,17	0,32	12,24	12,89
práce do přetrhu [N.m]	0,24	0,03	10,95	0,01	0,23	0,24
50_100						
pevnost [N]	87,99	4,75	5,40	1,33	86,66	89,32
tažnost [%]	12,35	0,82	6,62	0,23	12,12	12,58
práce do přetrhu [N.m]	0,25	0,02	9,38	0,01	0,24	0,25
50_200						
pevnost [N]	88,52	5,87	6,64	1,64	86,88	90,16
tažnost [%]	12,45	1,04	8,32	0,29	12,16	12,74
práce do přetrhu [N.m]	0,25	0,03	11,96	0,01	0,24	0,26
50_250						
pevnost [N]	87,95	7,01	7,97	1,96	85,99	89,91
tažnost [%]	12,69	1,08	8,51	0,30	12,38	12,99
práce do přetrhu [N.m]	0,25	0,03	12,27	0,01	0,24	0,26
50_500						
pevnost [N]	86,25	6,18	7,16	1,71	84,54	87,97
tažnost [%]	12,36	0,87	7,08	0,24	12,11	12,60
práce do přetrhu [N.m]	0,24	0,03	11,99	0,01	0,23	0,25

Tabulka B.7: Základní statistické charakteristiky pro Kevlar multifil s upínací délkou 100 mm.

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Interval spolehlivosti	Dolní mez IS	Horní mez IS
100_50						
pevnost [N]	81,71	5,81	7,12	1,61	80,09	83,32
tažnost [%]	6,99	0,58	8,32	0,16	6,83	7,15
práce do přetrhu [N.m]	0,28	0,04	13,32	0,01	0,27	0,29
100_100						
pevnost [N]	85,97	5,69	6,62	1,59	84,38	87,57
tažnost [%]	7,56	0,51	6,78	0,14	7,42	7,71
práce do přetrhu [N.m]	0,31	0,03	11,25	0,01	0,30	0,32
100_200						
pevnost [N]	86,48	5,35	6,19	1,50	84,98	87,97
tažnost [%]	7,67	0,53	6,88	0,15	7,53	7,82
práce do přetrhu [N.m]	0,31	0,03	10,58	0,01	0,30	0,32
100_250						
pevnost [N]	86,38	4,77	5,52	1,32	85,06	87,70
tažnost [%]	7,65	0,41	5,37	0,11	7,54	7,77
práce do přetrhu [N.m]	0,31	0,03	9,85	0,01	0,30	0,32
100_500						
pevnost [N]	84,94	5,57	6,56	1,56	83,38	86,50
tažnost [%]	7,64	0,45	5,91	0,13	7,52	7,77
práce do přetrhu [N.m]	0,30	0,03	10,29	0,01	0,29	0,31

Tabulka B.8: Základní statistické charakteristiky pro Kevlar multifil s upínací délkou 200 mm.

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Interval spolehlivosti	Dolní mez IS	Horní mez IS
200_50						
pevnost [N]	78,44	8,03	10,23	2,22	76,21	80,66
tažnost [%]	4,99	0,49	9,77	0,14	4,85	5,12
práce do přetrhu [N.m]	0,38	0,07	18,52	0,02	0,36	0,40
200_100						
pevnost [N]	82,46	5,35	6,48	1,48	80,98	83,94
tažnost [%]	5,49	0,34	6,23	0,09	5,39	5,58
práce do přetrhu [N.m]	0,42	0,05	11,76	0,01	0,41	0,44
200_200						
pevnost [N]	81,70	4,93	6,03	1,38	80,32	83,08
tažnost [%]	5,46	0,30	5,49	0,08	5,38	5,55
práce do přetrhu [N.m]	0,42	0,04	10,56	0,01	0,40	0,43
200_250						
pevnost [N]	81,83	5,12	6,25	1,43	80,39	83,26
tažnost [%]	5,50	0,33	6,06	0,09	5,41	5,59
práce do přetrhu [N.m]	0,42	0,05	10,90	0,01	0,40	0,43
200_500						
pevnost [N]	82,69	5,26	6,37	1,47	81,22	84,17
tažnost [%]	5,43	0,32	5,85	0,09	5,34	5,52
práce do přetrhu [N.m]	0,42	0,05	11,81	0,01	0,41	0,43

Tabulka B.9: Základní statistické charakteristiky pro Kevlar multifil s upínací délkou 350 mm.

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Interval spolehlivosti	Dolní mez IS	Horní mez IS
350_50						
pevnost [N]	80,81	7,05	8,73	1,97	78,84	82,79
tažnost [%]	4,12	0,33	8,08	0,09	4,03	4,21
práce do přetrhu [N.m]	0,57	0,09	15,68	0,03	0,55	0,60
350_100						
pevnost [N]	81,99	5,81	7,09	1,63	80,36	83,62
tažnost [%]	4,32	0,33	7,62	0,09	4,23	4,41
práce do přetrhu [N.m]	0,60	0,07	12,46	0,02	0,58	0,62
350_200						
pevnost [N]	82,12	5,47	6,66	1,53	80,59	83,65
tažnost [%]	4,42	0,31	7,02	0,09	4,33	4,50
práce do přetrhu [N.m]	0,60	0,07	12,30	0,02	0,58	0,62
350_250						
pevnost [N]	85,55	5,89	6,88	1,65	83,90	87,20
tažnost [%]	4,49	0,31	7,01	0,09	4,41	4,58
práce do přetrhu [N.m]	0,64	0,08	12,45	0,02	0,61	0,66
350_500						
pevnost [N]	77,47	6,84	8,82	1,89	75,57	79,36
tažnost [%]	4,19	0,31	7,37	0,09	4,11	4,28
práce do přetrhu [N.m]	0,55	0,08	15,22	0,02	0,52	0,57

Tabulka B.10: Základní statistické charakteristiky pro Kevlar multifil s upínací délkou 500 mm.

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Interval spolehlivosti	Dolní mez IS	Horní mez IS
500_50						
pevnost [N]	83,77	5,41	6,45	1,50	82,27	85,27
tažnost [%]	4,14	0,24	5,91	0,07	4,07	4,20
práce do přetrhu [N.m]	0,81	0,09	10,74	0,02	0,79	0,84
500_100						
pevnost [N]	79,69	5,91	7,41	1,64	78,05	81,33
tažnost [%]	3,94	0,27	6,75	0,07	3,87	4,02
práce do přetrhu [N.m]	0,75	0,10	12,95	0,03	0,72	0,77
500_200						
pevnost [N]	81,73	6,89	8,43	1,91	79,82	83,64
tažnost [%]	3,93	0,34	8,54	0,09	3,84	4,02
práce do přetrhu [N.m]	0,77	0,12	15,67	0,03	0,73	0,80
500_250						
pevnost [N]	83,55	6,18	7,39	1,71	81,84	85,26
tažnost [%]	3,99	0,26	6,41	0,07	3,91	4,06
práce do přetrhu [N.m]	0,80	0,10	12,97	0,03	0,77	0,83
500_500						
pevnost [N]	84,52	4,22	4,99	1,18	83,34	85,70
tažnost [%]	4,02	0,19	4,84	0,05	3,97	4,08
práce do přetrhu [N.m]	0,81	0,07	8,73	0,02	0,79	0,83

Tabulka B.11: Základní statistické charakteristiky pro Kevlar příze s upínací délkou 50 mm.

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Interval spolehlivosti	Dolní mez IS	Horní mez IS
50_50						
pevnost [N]	17,03	3,19	18,75	0,89	16,15	17,92
tažnost [%]	7,00	0,92	13,16	0,26	6,75	7,26
práce do přetrhu [N.m]	0,03	0,01	24,97	0,00	0,03	0,03
50_100						
pevnost [N]	17,54	3,15	17,97	0,87	16,67	18,41
tažnost [%]	7,12	0,96	13,52	0,27	6,85	7,39
práce do přetrhu [N.m]	0,03	0,01	25,44	0,00	0,03	0,03
50_200						
pevnost [N]	17,75	3,48	19,60	0,96	16,79	18,72
tažnost [%]	7,14	0,96	13,49	0,27	6,87	7,40
práce do přetrhu [N.m]	0,03	0,01	29,13	0,00	0,03	0,04
50_250						
pevnost [N]	17,01	3,41	20,08	0,95	16,06	17,95
tažnost [%]	6,97	0,98	14,01	0,27	6,70	7,24
práce do přetrhu [N.m]	0,03	0,01	26,35	0,00	0,03	0,04
50_500						
pevnost [N]	15,59	3,37	21,61	0,93	14,66	16,53
tažnost [%]	6,61	0,99	14,93	0,27	6,34	6,88
práce do přetrhu [N.m]	0,03	0,01	29,68	0,00	0,03	0,03

Tabulka B.12: Základní statistické charakteristiky pro Kevlar příze s upínací délkou 100 mm.

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Interval spolehlivosti	Dolní mez IS	Horní mez IS
100_50						
pevnost [N]	20,40	2,42	11,85	0,67	19,73	21,07
tažnost [%]	4,92	0,49	9,97	0,14	4,78	5,05
práce do přetrhu [N.m]	0,05	0,01	18,45	0,00	0,05	0,05
100_100						
pevnost [N]	19,86	2,74	13,82	0,76	19,09	20,62
tažnost [%]	4,84	0,46	9,54	0,13	4,71	4,97
práce do přetrhu [N.m]	0,05	0,01	20,72	0,00	0,04	0,05
100_200						
pevnost [N]	20,02	3,03	15,13	0,84	19,18	20,86
tažnost [%]	4,93	0,46	9,30	0,13	4,81	5,06
práce do přetrhu [N.m]	0,05	0,01	21,28	0,00	0,05	0,05
100_250						
pevnost [N]	17,19	3,80	22,13	1,05	16,14	18,25
tažnost [%]	4,58	0,59	12,84	0,16	4,42	4,75
práce do přetrhu [N.m]	0,04	0,01	29,97	0,00	0,04	0,05
100_500						
pevnost [N]	16,93	2,83	16,69	0,78	16,15	17,71
tažnost [%]	4,62	0,45	9,84	0,13	4,49	4,74
práce do přetrhu [N.m]	0,04	0,01	19,57	0,00	0,04	0,05

Tabulka B.13: Základní statistické charakteristiky pro Kevlar příze s upínací délkou 200 mm.

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Interval spolehlivosti	Dolní mez IS	Horní mez IS
200_50						
pevnost [N]	16,65	3,01	18,11	0,84	15,81	17,48
tažnost [%]	3,29	0,33	9,99	0,09	3,20	3,39
práce do přetrhu [N.m]	0,05	0,01	25,23	0,00	0,05	0,06
200_100						
pevnost [N]	20,30	2,27	11,19	0,64	19,67	20,94
tažnost [%]	3,50	0,25	7,09	0,07	3,43	3,57
práce do přetrhu [N.m]	0,07	0,01	16,76	0,00	0,07	0,07
200_200						
pevnost [N]	18,14	2,78	15,32	0,77	17,37	18,91
tažnost [%]	3,47	0,32	9,30	0,09	3,38	3,56
práce do přetrhu [N.m]	0,06	0,01	22,39	0,00	0,06	0,07
200_250						
pevnost [N]	20,34	2,94	14,46	0,82	19,53	21,16
tažnost [%]	3,53	0,32	9,19	0,09	3,44	3,62
práce do přetrhu [N.m]	0,07	0,01	20,46	0,00	0,07	0,07
200_500						
pevnost [N]	19,82	2,28	11,53	0,63	19,18	20,45
tažnost [%]	3,57	0,23	6,30	0,06	3,51	3,63
práce do přetrhu [N.m]	0,07	0,01	15,53	0,00	0,07	0,07

Tabulka B.14: Základní statistické charakteristiky pro Kevlar příze s upínací délkou 350 mm.

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Interval spolehlivosti	Dolní mez IS	Horní mez IS
350_50						
pevnost [N]	18,41	1,86	10,09	0,51	17,89	18,92
tažnost [%]	2,88	0,20	6,92	0,06	2,82	2,93
práce do přetrhu [N.m]	0,09	0,01	13,60	0,00	0,09	0,09
350_100						
pevnost	17,56	1,95	11,11	0,54	17,02	18,10
tažnost [%]	2,72	0,21	7,55	0,06	2,67	2,78
práce do přetrhu [N.m]	0,08	0,01	16,63	0,00	0,08	0,09
350_200						
pevnost [N]	17,75	2,55	14,35	0,71	17,04	18,45
tažnost [%]	2,67	0,21	7,85	0,06	2,62	2,73
práce do přetrhu [N.m]	0,08	0,02	19,95	0,00	0,08	0,09
350_250						
pevnost [N]	17,73	2,29	12,94	0,64	17,09	18,37
tažnost [%]	2,69	0,24	8,98	0,07	2,62	2,75
práce do přetrhu [N.m]	0,08	0,02	20,36	0,00	0,08	0,09
350_500						
pevnost [N]	18,83	2,63	13,97	0,73	18,10	19,55
tažnost [%]	2,80	0,24	8,55	0,07	2,73	2,86
práce do přetrhu [N.m]	0,09	0,02	20,42	0,01	0,09	0,10

Tabulka B.15: Základní statistické charakteristiky pro Kevlar příze s upínací délkou 500 mm.

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Interval spolehlivosti	Dolní mez IS	Horní mez IS
500_50						
pevnost [N]	16,05	2,25	14,01	0,62	15,43	16,67
tažnost [%]	2,37	0,24	9,94	0,07	2,30	2,43
práce do přetrhu [N.m]	0,09	0,02	21,77	0,01	0,09	0,10
500_100						
pevnost [N]	17,48	2,22	12,68	0,61	16,87	18,10
tažnost [%]	2,47	0,23	9,16	0,06	2,41	2,54
práce do přetrhu [N.m]	0,11	0,02	20,03	0,01	0,10	0,11
500_200						
pevnost [N]	18,36	2,32	12,61	0,64	17,72	19,00
tažnost [%]	2,56	0,22	8,49	0,06	2,50	2,63
práce do přetrhu [N.m]	0,11	0,02	18,72	0,01	0,11	0,12
500_250						
pevnost [N]	18,54	2,10	11,32	0,58	17,96	19,13
tažnost [%]	2,55	0,21	8,18	0,06	2,49	2,61
práce do přetrhu [N.m]	0,12	0,02	17,74	0,01	0,11	0,12
500_500						
pevnost [N]	18,81	2,45	13,02	0,68	18,13	19,49
tažnost [%]	2,46	0,24	9,62	0,07	2,40	2,53
práce do přetrhu [N.m]	0,12	0,03	22,03	0,01	0,11	0,12